

## Resum

Aquest document descriu la metodologia seguida per desenvolupar un model dels elements que conformen o estan relacionats amb el tren de potència d'un vehicle elèctric utilitzant el programa MATLAB Simulink. En especial un monoplaça de competició com és el CAT-07e, dissenyat i desenvolupat pels estudiants de l'equip ETSEIB Motorsport.

L'ETSEIB Motorsport és un equip format per estudiants de L'ETSEIB que cada any construeixen un monoplaça elèctric per participar en diverses competicions de la Formula Student juntament amb altres universitats de tot el món. En aquestes competicions es posa a prova els vehicles no només des del punt de vista dinàmic sinó que també es realitzen proves estàtiques, que enfoquen el projecte des del punt de vista més empresarial, així com una defensa del disseny del monoplaça.

La finalitat d'aquest projecte és proporcionar una eina a l'equip per poder realitzar estudis i simulacions de caràcter energètic. D'aquesta manera a partir de diverses dades dels diferents components i imposant un cicle de treball a realitzar (un circuit i unes velocitats del vehicle) poder obtenir valors associats al consum d'energia per part del monoplaça així com una visió general d'aquells factors que comporten aquest consum.

Aquest projecte permetrà dur a terme les simulacions pertinents per poder dimensionar l'energia que caldrà emmagatzemar a partir dels consums calculats, analitzar l'estat de les bateries després d'un cicle determinat, veure l'evolució dels valors de tensions i corrents que passaran a través dels diversos elements i així poder fer una tria acurada d'elements de seguretat i protecció del circuit, planificar les càrregues de les bateries durant les competicions i també analitzar com afecten les forces que s'oposen al seu moviment.

L'escrit inclou una introducció a l'equip ETSEIB Motorsport i a la competició Formula Student, l'estudi dels elements comprenen el tren de potència del vehicle així com el seu model matemàtic detallat implementat amb Simulink, les simulacions realitzades basades en proves reals de les competicions, i finalment un apartat on s'expliquen les possibles vies de continuació d'aquest projecte, amb l'objectiu d'aconseguir un model global del monoplaça des de tots els punts de vista.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>5</b>
1.1. Símbols i variables	5
1.2. Índex de figures	9
1.3. Índex de taules	11
<b>2. PREFACI</b>	<b>12</b>
2.1. Origen del projecte	12
2.2. Motivació	12
2.3. Requeriments previs	13
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>14</b>
3.1. Objectius del projecte	14
3.2. Abast del projecte	14
<b>4. DESCRIPCIÓ DELS ELEMENTS I IMPLEMENTACIÓ DEL MODEL</b>	<b>15</b>
4.1. El tren de potència del CAT-07e	15
4.2. El sistema d'emmagatzematge d'energia	19
4.2.1. Introducció i tipus de sistemes d'emmagatzematge d'energia	19
4.2.2. Bateria electroquímica	19
4.2.3. Ultracondensadors	22
4.2.4. Bateria inercial (Ultra High Speed Flywheels)	22
4.2.5. Les bateries del CAT-07e	22
4.2.6. Model de les bateries en MATLAB Simulink	24
4.3. El convertidor	27
4.3.1. Introducció als convertidors	27
4.3.2. Els inversors del CAT-07e	27
4.3.3. Model dels inversors	29
4.4. El Motor	30
4.4.1. Introducció al motor d'imants permanents	30
4.4.2. Els motors del CAT-07e	31
4.4.3. Model dels motors	32
4.5. Transmissió i roda	41
4.5.1. Les transmissions i les rodes del CAT-07e	41
4.5.2. Model de la transmissió i el contacte amb el terra	42
4.6. El Xassís	44

4.6.1.	El xassís del CAT-07e .....	44
4.6.2.	Model del xassís .....	44
4.7.	Model de les condicions de l'entorn .....	46
4.8.	Model del llaç de control .....	48
4.8.1.	El controlador de velocitat .....	48
4.8.2.	Pas de força de referència a parell de referència.....	49
4.8.3.	Pas de parell de referència a intensitat d,q de referència.....	50
4.8.4.	Controlador de les intensitats.....	50
4.8.5.	El modulador.....	51
<b>5.</b>	<b>VALIDACIÓ DEL MODEL .....</b>	<b>54</b>
5.1.	Validació del model de les bateries .....	55
5.2.	Validació del model del motor.....	56
<b>6.</b>	<b>SIMULACIONS .....</b>	<b>58</b>
6.1.	Simulació de l'Skid Pad .....	60
6.2.	Simulació de l'acceleració.....	65
6.3.	Simulació de l'autocross .....	71
6.4.	Simulació de l'endurance.....	75
<b>7.</b>	<b>ANÀLISI DELS RESULTATS I CONCLUSIONS .....</b>	<b>78</b>
<b>8.</b>	<b>FUTURES LÍNIES DE TREBALL .....</b>	<b>79</b>
<b>9.</b>	<b>ESTUDI ECONÒMIC .....</b>	<b>80</b>
<b>10.</b>	<b>PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE .....</b>	<b>81</b>
<b>11.</b>	<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>83</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>84</b>
12.1.	Referències bibliogràfiques.....	84
12.2.	Bibliografia complementària.....	84



# 1. Glossari

## 1.1. Símbols i variables

<b>SOC</b>	State Of Charge , estat de càrrega de la bateria
<b><math>\Delta G</math></b>	Energia lliure de Gibbs
<b>Ni-Cd</b>	Tecnologia Níquel-Cadmi
<b>Ni-MH</b>	Tecnologia Níquel-Metal Hydride
<b>SRM</b>	Switched Reluctance Motor
<b>Li-FePO<sub>4</sub></b>	Tecnologia Liti – Ferro-Fosfat
<b>Li-Po</b>	Tecnologia Liti-Polímer
<b>E</b>	Tensió de la cel·la
<b>E<sub>0</sub></b>	Tensió constant de la cel·la
<b>K</b>	Voltatge de polarització
<b>Q</b>	Capacitat de la cel·la
<b>it</b>	Càrrega elèctrica consumida per la bateria
<b>A</b>	Ample de la zona exponencial de la corba de descàrrega Inversa de la constant de temps de la zona exponencial de la corba de descàrrega
<b>B</b>	
<b>V<sub>bat</sub></b>	Voltatge de la bateria
<b>I<sub>bat</sub></b>	Corrent de la bateria
<b>Q<sub>exp</sub></b>	Càrrega al final de la part exponencial
<b>E<sub>full</sub></b>	Voltatge de la cel·la carregada al 100%
<b>E<sub>nom</sub></b>	Voltatge de la cel·la al final de la zona nominal
<b>Q<sub>nom</sub></b>	Càrrega al final de la zona nominal
<b>R</b>	resistència interna de la cel·la
<b>N_cells_par</b>	Nombre de cel·les en paral·lel
<b>N_cells_serie</b>	Nombre de cel·les en sèrie
<b>I<sub>dc</sub></b>	Corrent continu de les bateries
<b>U<sub>dc</sub></b>	Tensió contínua de les bateries
<b>CC</b>	Corrent continu
<b>AC</b>	Corrent altern
<b>i<sub>d,q</sub></b>	Corrent en coordenades d,q
<b>u<sub>d,q</sub></b>	Tensió en coordenades d,q
<b>m<sub>d,q</sub></b>	Senyal del modulador en coordenades d,q
<b>PMDC</b>	Permanent Magnet Direct Current
<b>PMAc</b>	Permanent Magnet Alternating Current
<b>BLDCM</b>	Brushless DC Motors
<b>PMSM</b>	Permanent Magnets Synchronous Motor

<b>SPMSM</b>	Surface Permanent Magnet Synchronous Motor
<b>IPMSM</b>	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
<b><math>R_s</math></b>	Resistència dels debanats de l'estàtor
<b><math>i_{abcs}</math></b>	Intensitat en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>i_{as}</math></b>	Intensitat de la branca a en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>i_{bs}</math></b>	Intensitat de la branca b en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>i_{cs}</math></b>	Intensitat de la branca c en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>\lambda_{abcs}</math></b>	Flux magnètic en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>\lambda_{as}</math></b>	Flux magnètic de la branca a en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>\lambda_{bs}</math></b>	Flux magnètic de la branca b en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>\lambda_{cs}</math></b>	Flux magnètic de la branca c en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>v_{abcs}</math></b>	Tensió en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>v_{as}</math></b>	Tensió de la branca a en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>v_{bs}</math></b>	Tensió de la branca b en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>v_{cs}</math></b>	Tensió de la branca c en coordenades abc de l'estàtor
<b><math>\theta_r</math></b>	Angle de gir del rotor
<b><math>\lambda_m</math></b>	Flux magnètic creat pels imants del rotor
<b><math>L_{ls}</math></b>	Inductància de dispersió
<b><math>L_A</math></b>	inducància de la bobina
<b><math>L_B</math></b>	Inductància de la bobina
<b><math>L_{aas}</math></b>	Autoinductància de la branca a de la bobina del rotor
<b><math>L_{bbs}</math></b>	Autoinductància de la branca b de la bobina del rotor
<b><math>L_{ccs}</math></b>	Autoinductància de la branca c de la bobina del rotor
<b><math>L_{abs}</math></b>	Inductància de les branques a i b de la bobina del rotor
<b><math>L_{bas}</math></b>	Inductància de les branques b i a de la bobina del rotor
<b><math>L_{acs}</math></b>	Inductància de les branques a i c de la bobina del rotor
<b><math>L_{cas}</math></b>	Inductància de les branques c i a de la bobina del rotor
<b><math>L_{bcs}</math></b>	Inductància de les branques b i c de la bobina del rotor
<b><math>L_{cbs}</math></b>	Inductància de les branques c i b de la bobina del rotor
<b><math>N_s</math></b>	Nombre de voltes de les bobines
<b><math>r</math></b>	Radi des del centre de la circumferència interior de l'estàtor
<b><math>l</math></b>	Longitud axial de l'entreferro
<b><math>\mu_0</math></b>	permeabilitat de l'aire
<b><math>\epsilon_1</math></b>	Gruix màxim de l'entreferro
<b><math>\epsilon_2</math></b>	Gruix mínim de l'entreferro
<b><math>\alpha</math></b>	Primera component de les coordenades de la transformada de Clarke
<b><math>\beta</math></b>	Segona component de les coordenades de la transformada de Clarke
<b><math>i_\alpha</math></b>	Intensitat de la branca $\alpha$ en coordenades $\alpha, \beta$
<b><math>i_\beta</math></b>	Intensitat de la branca $\beta$ en coordenades $\alpha, \beta$
<b><math>i_o</math></b>	Intensitat de la branca o en coordenades $\alpha, \beta$
<b><math>\rho(\theta_r)</math></b>	Matriu de gir del sistema de referència $\alpha, \beta$

$i_{odq}$	Intensitat $i_o$ en coordenades d,q
$v_o$	Tensió $v_o$ en coordenades d,q
$v_d$	Tensió directa en coordenades d,q
$v_q$	Tensió de quadratura en coordenades d,q
$\omega_r$	Velocitat angular elèctrica del motor
$L_d$	Inductància de la branca d en coordenades d,q
$L_q$	Inductància de la branca q en coordenades d,q
$\lambda_r$	Flux magnètic del rotor
$\lambda_s$	Flux magnètic de l'estàtor
$v_{o_s}^r$	Tensió $v_o$ de l'estàtor en referència rotor
$v_{d_s}^r$	Tensió $v_d$ de l'estàtor en referència rotor
$v_{q_s}^r$	Tensió $v_q$ de l'estàtor en referència rotor
$i_{o_s}^r$	Intensitat $i_o$ de l'estàtor en referència rotor
$i_{d_s}^r$	Intensitat $i_d$ de l'estàtor en referència rotor
$i_{q_s}^r$	Intensitat $i_q$ de l'estàtor en referència rotor
$\omega_{rm}$	Velocitat angular mecànica del rotor
$n$	Nombre de parells de pols
$P_e$	Potència elèctrica
$P_{em}$	Potència electromecànica
$T_e$	Parell elèctric
$\lambda_{dam}$	Flux magnètic creat pels imants del rotor
$i$	Relació de transmissió
$\mu$	Coeficient de fregament
$\eta_{trans}$	Rendiment de la transmissió
$\Gamma_{motor}$	Parell motor
$\Gamma_{roda}$	Parell a la roda
$\omega_{motor}$	Velocitat angular del motor
$\omega_{roda}$	Velocitat angular de la roda
$F_{roda}$	Força de tracció a la roda
$r_{roda}$	Radi de la roda amb pneumàtic
$F_t$	Força de tracció
$R_{corba}$	Radi de curvatura del circuit
$v_{roda}$	
<b>esquerra</b>	Velocitat lineal de la roda esquerra
<b>vroda dreta</b>	Velocitat lineal de la roda dreta
<b>amplevia</b>	Ample de via del vehicle
<b>Fr</b>	Força resistiva total
<b>vveh</b>	Velocitat lineal del vehicle
<b>M</b>	Massa del vehicle
<b><math>\rho</math></b>	Densitat de l'aire
<b>Cd</b>	Coeficient de drag
<b>Cl</b>	Coeficient de downforce
<b>Af</b>	Àrea frontal de drag

<b>va</b>	Velocitat de l'aire
<b>g</b>	Acceleració de la gravetat a la Terra
<b>hg</b>	Alçada del centre de gravetat del vehicle
<b>fr</b>	Coeficient de rodadura
<b>alpha</b>	Angle d'inclinació del circuit
<b>Kp</b>	Constant proporcional del controlador
<b>Ki</b>	Constant integradora del controlador
<b>Fdrag</b>	Força de drag
<b>Fdownforce</b>	Força de downforce
<b>Fpes</b>	Força del pes
<b>Frodadura</b>	Força de rodadura
<b>T</b>	Parell motor
<b>Nr</b>	Força normal posterior



## 1.2. Índex de figures

Figura 4.1 Elements del tren de potencia del CAT-07e .....	15
Figura 4.2 Esquema dels elements del tren de potencia del CAT-07e.....	16
Figura 4.3 Estructura REM del tren de potencia del CAT-07e.....	18
Figura 4.4 Evolució del SOC durant la descàrrega d'una bateria .....	20
Figura 4.5 Cel·les del CAT-07e .....	23
Figura 4.6 Model dinàmic d'una bateria d'ió-liti .....	24
Figura 4.7 Zones característiques de la corba de descàrrega.....	25
Figura 4.8 Els inversors del CAT-07e.....	28
Figura 4.9 Motors Ma-55 del CAT-07e .....	31
Figura 4.10 Coordenades abc i dq .....	35
Figura 4.11 Esquema del sistema en coordenades dq .....	38
Figura 4.12 Transmissió del CAT-07e.....	41
Figura 4.13 Roda del CAT-07e.....	42
Figura 4.14 Carroceria, Monocasc, subxassís i fons pla del CAT-07e .....	44
Figura 4.15 Controlador de la velocitat.....	48
Figura 4.16 Model complet del CAT-07e.....	52
Figura 5.1 Corba de descàrrega del fabricant .....	55
Figura 5.2 Corba de descàrrega obtinguda pel model.....	55
Figura 5.3 Resposta de $I_q$ davant una consigna graó de 20 A.....	56
Figura 5.4 Resposta real de $I_q$ davant una entrada graó de 20 A .....	57
Figura 6.1 Circuit de la prova de l'Skid Pad.....	60
Figura 6.2 Velocitats real i de referència en l'Skid Pad.....	61

Figura 6.3 Distància recorreguda en l'Skid Pad .....	61
Figura 6.4 Voltatge de bateries durant l'Skid Pad.....	62
Figura 6.5 Intensitat de bateries durant l'Skid Pad .....	63
Figura 6.6 Energia consumida durant la realització de l'Skid Pad .....	63
Figura 6.7 Evolució del SOC durant l'Skid Pad .....	64
Figura 6.8 Comparació de les velocitats de referència i reals en una acceleració.....	65
Figura 6.9 Distància recorreguda durant l'acceleració.....	66
Figura 6.10 Comparació de les forces normals durant l'acceleració .....	67
Figura 6.11 Voltatge de bateries durant l'acceleració.....	67
Figura 6.12 Intensitat de bateries durant l'acceleració.....	68
Figura 6.13 Potència desenvolupada pels motors durant l'acceleració .....	69
Figura 6.14 Energia consumida durant l'acceleració .....	69
Figura 6.15 Evolució del SOC durant l'acceleració.....	70
Figura 6.16 Circuit de l'autocross .....	71
Figura 6.17 Comparació de les velocitats de referència i real durant l'autocross .....	72
Figura 6.18 Velocitats del vehicle, roda dreta i roda esquerra.....	72
Figura 6.19 Voltatge de bateries durant l'autocross .....	73
Figura 6.20 Intensitat de bateries durant l'autocross .....	73
Figura 6.21 Evolució del SOC durant l'autocross .....	74
Figura 6.22 Energia consumida durant l'autocross .....	74
Figura 6.23 Distància recorreguda durant l'endurance.....	75
Figura 6.24 Energia consumida durant l'endurance .....	76

Figura 6.25 Evolució del SOC durant l'endurance.....	76
Figura 6.26 Voltatge de bateries durant l'endurance .....	77
Figura 6.27 Intensitat de bateries durant l'endurance.....	77

### **1.3. Índex de taules**

Taula 4.1 Subsistemes de la REM .....	17
Taula 4.2 Paràmetres del motor .....	40
Taula 5.1 Taula de paràmetres del model .....	54
Taula 6.1 Horari oficial de les proves de la Fórmula Student Germany 2014 .....	58
Taula 9.1 Cost dels recursos humans de projecte.....	80
Taula 10.1 Programació del projecte.....	81
Taula 10.2 Calendari del projecte.....	82

## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

L'origen del projecte té lloc gràcies a la iniciativa de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona i un grup dels seus estudiants de crear un monoplaça de competició i participar a la Formula Student. En aquesta competició es valora molt positivament que cada aspecte de la fase de disseny tingui un raonament robust, de manera que sigui possible defensar aquest disseny i cada elecció empresa de manera lògica i fonamentada.

Un aspecte molt important de la competició és el compliment de la normativa específica de la Fórmula Student a l'hora de dissenyar i construir el vehicle. Les directrius més importants que afecten a la secció del tren de potència a nivell elèctric són aquelles que regulen la potència màxima a 85 kW i la tensió màxima de la font d'emmagatzematge d'energia a 600 V, restriccions que caldrà tenir en compte a l'hora de dissenyar el sistema.

Cercant aquest objectiu, s'han desenvolupat diversos mètodes per dimensionar totes les parts del vehicle però enguany mancava un model que permetés defensar el disseny de l'aparat de bateries, la qual forma part de la secció de Powertrain, o tren de potència.

### 2.2. Motivació

Així doncs, la motivació ve donada per aquest buit en la metodologia del disseny, la falta d'una eina capaç de poder proporcionar les dades i valors adients per escollir la quantitat d'energia necessària per emmagatzemar, el nombre de cel·les que han de contenir les bateries, i en general aquells aspectes relacionats amb la part de potència elèctrica del monoplaça.

A més a més cal sumar-li el fet de tenir la possibilitat de crear un vehicle de competició posant a la pràctica coneixements adquirits durant la carrera i altres d'apresos durant la realització del projecte ampliant la formació acadèmica i vivint una experiència molt útil de cara al futur laboral.

## 2.3. Requeriments previs

Per dur a terme aquest projecte cal tenir un bon coneixement de tots els elements que entren en joc quan es parla del tren de potència d'un vehicle elèctric (font d'alimentació, convertidors, motors, elements de transmissió, rodes) així com les condicions de l'entorn en el qual es troba el vehicle. També cal tenir nocions d'implementació de controladors ja que per poder realitzar les simulacions caldrà tancar llaços de control. Per últim cal tenir coneixement de l'ús del programa MATLAB Simulink per poder realitzar el model i les simulacions pertinents.

## **3. Introducció**

### **3.1. Objectius del projecte**

L'objectiu principal del projecte és crear un model utilitzant el programa MATLAB Simulink dels elements que formen part del tren de potència d'un vehicle elèctric així com d'aquells factors que hi estan relacionats, de manera que sigui possible treure conclusions des del punt de vista energètic de diversos cicles de funcionament del monoplaça.

### **3.2. Abast del projecte**

En aquest projecte, aquells elements que es volen modelitzar amb més precisió són els que tenen més importància des del punt de vista elèctric, bàsicament bateries, motors i convertidors però per poder simular el comportament energètic del vehicle ha estat necessari modelitzar la transmissió del parell i el contacte amb el terra així com les diverses forces que actuen contra el moviment. Per tant el projecte queda enfocat elèctricament, sense tenir en compte molts dels paràmetres que expliquen la dinàmica del vehicle i que representarien els sistema de suspensions i el comportament del pneumàtic.

També s'ha simplificat el model del convertidor ja que modelitzar fidelment tots els seus elements sobrepassa l'horitzó del projecte.

Més endavant s'explica les possibles vies de continuació del projecte per tal de fer-lo més complet i exacte.

## 4. Descripció dels elements i implementació del model

En aquest capítol s'expliquen les característiques de tots els elements que conformen el tren de potència del vehicle elèctric, es fa una descripció detallada de cada un i com implementar el seu model amb MATLAB Simulink.

### 4.1. El tren de potència del CAT-07e

El tren de potència del CAT-07e segueix l'esquema de qualsevol vehicle elèctric. L'energia sortint de la font d'alimentació és transformada en el convertidor, el qual regula i controla aquesta energia en funció del cicle a realitzar, que després serà convertida en energia mecànica pel motor i tot seguit passant per la transmissió és aplicada als eixos de les rodes que les faran girar fent avançar el vehicle.

Sent més concrets, el CAT-07e conté dues caixes de bateries, que connectades en sèrie alimenten el sistema. L'energia de les bateries arriba als dos convertidors, on es passa de tenir una tensió i corrent continu a una tensió i corrent alterna trifàsica i que alimenten els dos motors que de manera independent i passant per les transmissions, fan moure les rodes dels eixos del darrere. En la *Figura 4.1* següent es pot apreciar les diverses parts nombrades anteriorment.

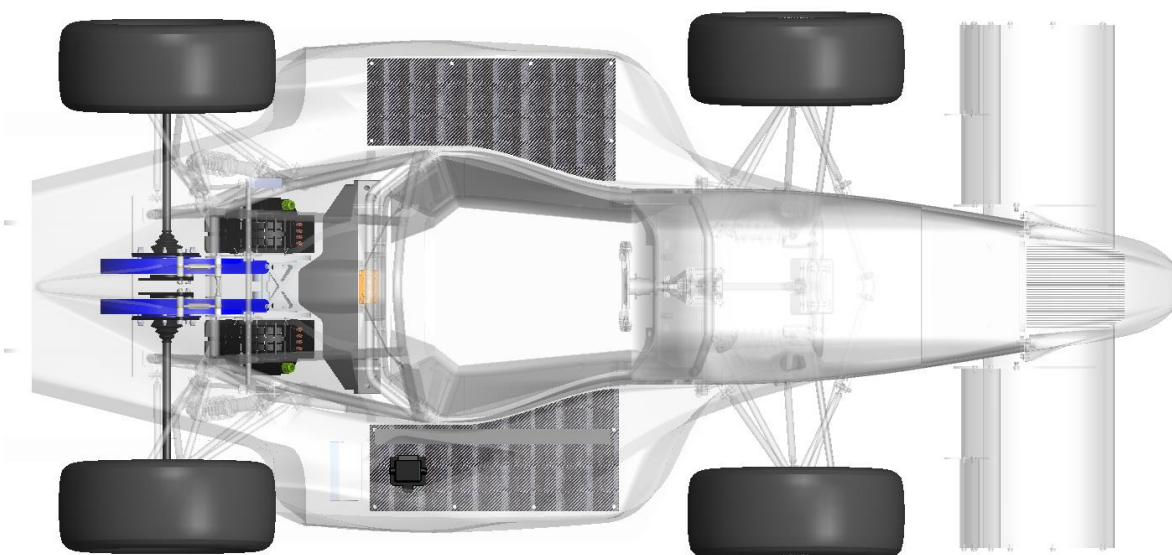


Figura 4.1 Elements del tren de potencia del CAT-07e

Les bateries són les caixes dels costats de l'habitacle del pilot, just darrere estan instal·lats els inversors, els motors i finalment la transmissió i les rodes.

La *Figura 4.2* resumeix de manera esquemàtica els elements modelats en aquest projecte

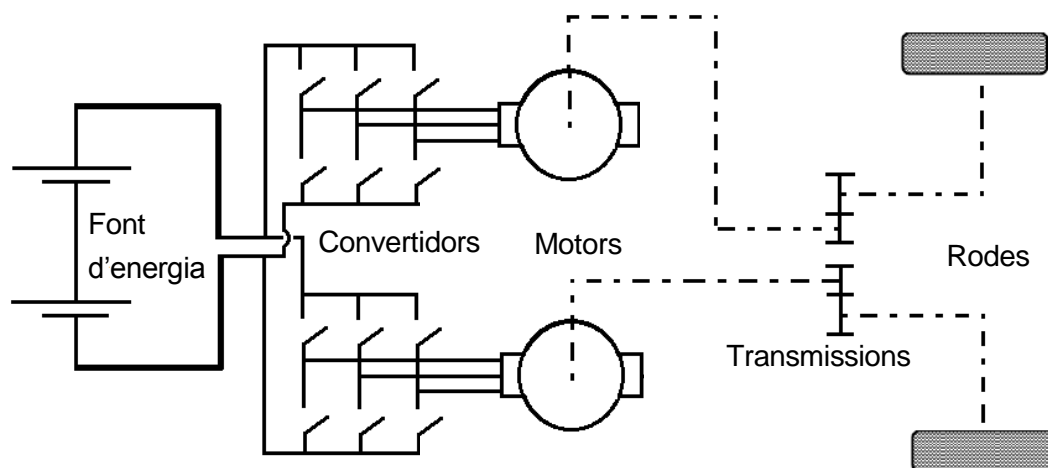


Figura 4.2 Esquema dels elements del tren de potencia del CAT-07e

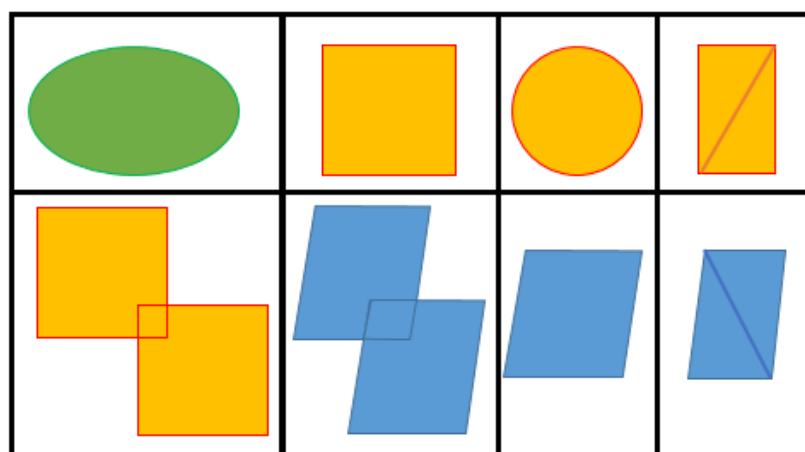


## Representació Energètica Macroscòpica

La metodologia utilitzada per representar aquests elements és l'eina gràfica anomenada representació energètica macroscòpica o REM.

El sistema es descompon en subsistemes que interaccionen entre si com són la font d'energia (oval verd), elements d'acumulació d'energia (Rectangle taronja amb la ratlla diagonal), elements de conversió d'energia sense acumulació (cercle i quadrat taronges), elements d'acoblament per la distribució de l'energia, els elements del llaç de control sense controlador (quadrilàter blau) o amb controlador (quadrilàter blau amb la ratlla diagonal).

La *Taula 4.1* mostra la representació gràfica d'aquests subsistemes. [1]

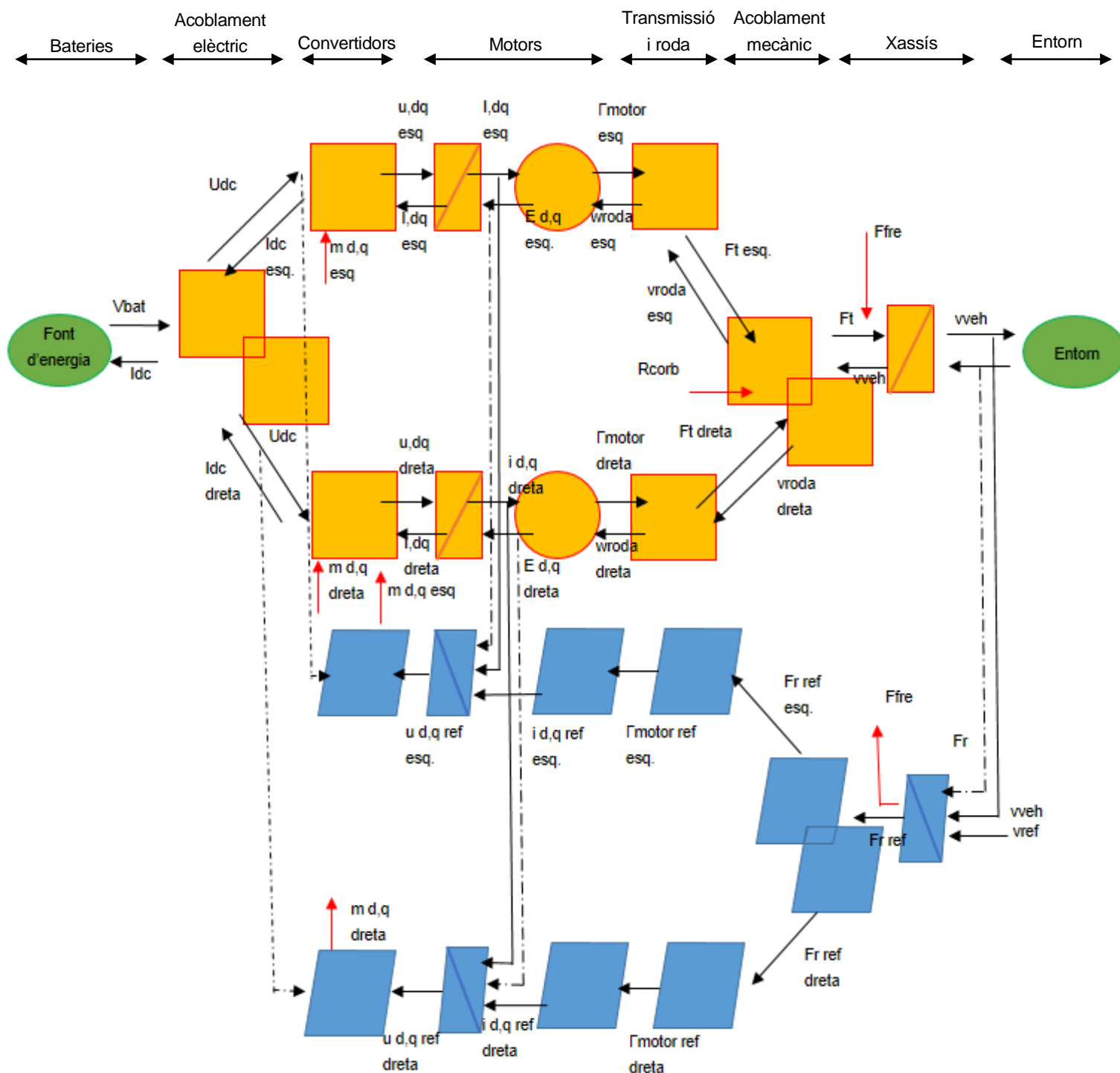


Taula 4.1 Subsistemes de la REM

Un aspecte de la REM és el control basat en el principi de la inversió, on es considera que l'estructura del llaç de control és la inversió dels elements que conformen el sistema. Seguint aquest mètode, les relacions sense dependència del temps es poden invertir directament, però a causa de la no derivació d'una relació causal, serà necessari implementar controladors que realitzin la inversió indirecta.

El CAT-07e té dos motors, dos inversors i dos transmissions, per tant l'ús de desacoblaments i acoblaments serà necessari en el sistema i en el llaç de control.

Fent ús d'aquesta tècnica el vehicle quedaria representat tal i com es pot veure a la *Figura 4.3*.



Un cop feta una petita descripció dels elements del tren de potència s'expliquen a continuació de manera més detallada així com la seva implementació amb MATLAB Simulink.

## **4.2. El sistema d'emmagatzematge d'energia**

### **4.2.1. Introducció i tipus de sistemes d'emmagatzematge d'energia**

El sistema d'emmagatzematge d'energia representa un dels elements bàsics i principals de qualsevol vehicle. Entenent el vehicle elèctric com aquell que és propulsat a partir de motors elèctrics, es pot diferenciar entre els que necessiten estar sempre connectats a la xarxa per funcionar, com seria el cas de trens o tramvies, o els que tenen un sistema d'emmagatzematge d'energia.

Triant aquest segon grup i concretament amb el cas del monoplaça CAT-07e, es fa èmfasi en aquells vehicles que només contenen un sistema d'emmagatzematge d'energia i en especial aquells on aquesta font d'alimentació són les bateries, formades per petits conjunts de cel·les (Stacks) agrupats i connectats entre si. També es nombren altres elements com els ultracondensadors i les bateries inercials.

### **4.2.2. Bateries electroquímiques**

Les bateries electroquímiques, són elements que converteixen l'energia potencial química en electricitat quan són descarregades i a l'inrevés quan es carreguen. Cada cel·la que compon la bateria està formada bàsicament per dos elèctrodes (positiu i negatiu), immersos en un electròlit. Hi ha molts tipus de bateries electroquímiques, de les quals les tecnologies més importants són les de plom-àcid, les basades en níquel, i les basades en liti.

#### **Característiques de les bateries**

Abans d'endinsar-se en el món de les bateries cal familiaritzar-se amb alguna de les seves característiques per poder comparar els diferents tipus que existeixen entre si. Aquestes són:

#### SOC

SOC o State of Charge s'expressa en percentatge i indica el nivell de càrrega de la bateria sent 1 completament carregada i 0 descarregada. Que la bateria estigui descarregada no implica que el voltatge sigui zero, significa que la bateria ha donat tota la càrrega emmagatzemada, aquest moment es dona quan arriba a un voltatge anomenat voltatge de tall (cut-off voltage) el valor del qual varia en cada tecnologia de bateria. En la *Figura 4.4* es pot apreciar l'evolució del SOC d'una cel·la, i com decreix de manera accentuada el voltatge al arribar al valor de tall.

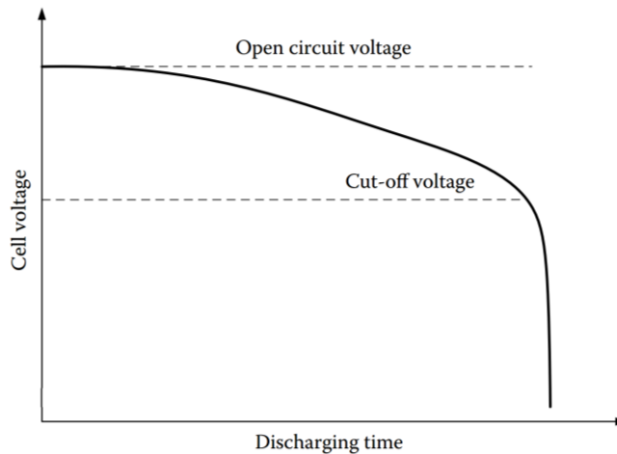


Figura 4.4 Evolució del SOC durant la descàrrega d'una bateria [2]

### Capacitat

Es defineix com el nombre d'Ampers hora que passen pels borns d'una bateria des d'un SOC 1 a un SOC 0 i dóna una idea del corrent que pot desenvolupar la bateria. Per exemple si una bateria és de 5 Ah vol dir que podrà subministrar un corrent de 5 A durant una hora, o de 1 A durant 5 hores, etc. Això no és exactament així ja que com més ràpid es descarregui la bateria major seran les pèrdues d'energia degut a la resistència interna.

### Tensió nominal

És aquell valor de tensió que es manté gairebé constant durant la descàrrega de la bateria. Comprèn la fase nominal de la corba de descàrrega.

### Energia específica

És l'energia emmagatzemada per la bateria dividida pel seu pes (Wh/kg). És un paràmetre que cal tenir molt en compte a l'hora de triar el tipus de bateries ja que si, per exemple, es vol alimentar un vehicle elèctric, s'intentarà que amb una massa baixa de bateries s'obtingui la màxima energia possible, la qual cosa significa una energia específica gran.

### Potència específica

Representa la màxima potència desenvolupada per la bateria en un instant de temps (W/kg), és una característica important en aplicacions que demanen una alta potència, com és el cas dels vehicles elèctrics.

### Condicions de càrrega i descàrrega

Són aquells valors que indiquen el règim de treball nominal i màxim durant la càrrega o la descàrrega de la bateria. S'han de tenir en compte per no malmetre-la i treure'n el màxim rendiment.

Passant a estudiar ara les principals tecnologies de bateries podem diferenciar:

#### **Bateries de plom-àcid**

Les bateries de tecnologia plom-àcid han tingut un paper molt important durant els últims cent anys i encara són molt utilitzades en el camp de l'automoció i altres aplicacions. Són bateries de baix cost, àmpliament estudiades i d'una relativa alta potència, no obstant tenen grans desavantatges com són una baixa densitat d'energia, un pes molt elevat i el rang de temperatures òptim de funcionament és molt petit. A més a més, la presència d'elements perillosos contra la seguretat dels ocupants (àcid sulfúric, emissions d'hidrogen, plom) fan que no sigui una tecnologia molt recomanable encara que en els últims anys aquests perills han disminuït.

#### **Bateries de base níquel**

El Níquel és un element més lleuger que el plom i té millors propietats electroquímiques, les seves diferents variants es divideixen en quatre tipus de bateries: ferro, zinc, cadmi i MH (metall hidrur) de les quals en destaquen les de Ni-Cd, per la seva gran densitat d'energia (per sobre de 200 W/kg) i les de Ni-MH, que s'utilitzen en molts vehicles híbrids i a més a més al no contenir cadmi són molt menys contaminants (les bateries de cadmi estan prohibides per ús domèstic).

#### **Bateries de base liti**

El liti és el metall més lleuger i presenta unes característiques electroquímiques molt interessants ja que permet un voltatge termodinàmic elevat, el qual deriva en una alta energia específica i alta potència específica. Bàsicament es divideixen en dues tecnologies, liti ió i liti polímer.

Aquestes tecnologies són considerades les més prometedores ja que tenen una gran densitat d'energia, tenen poques pèrdues amb el temps i requereixen baix manteniment tot i que també s'ha de tenir en compte que precisen d'un circuit de protecció que limiti el corrent i el voltatge ja que en cas contrari es degradarien ràpidament.

### 4.2.3. Ultracondensadors

Els ultracondensadors es diferencien de les bateries pel fet de contenir una major potència específica (sobre els 3 kW/kg) en contra d'una menor energia específica. Aquesta potència tan elevada és de gran utilitat en els vehicles elèctrics, on la potència mitjana demandada és molt menor que la potència de pic. No obstant això els ultracondensadors difícilment constituïran sols una font d'alimentació d'un vehicle, ja que la seva baixa densitat d'energia no donaria bons resultats. La millor opció seria optar per un sistema híbrid entre bateries i ultracondensadors de manera que sigui possible distribuir de manera intel·ligent l'energia en funció de la demanda.

### 4.2.4. Bateries inercials (Ultra High Speed Flywheels)

Els principis d'aquestes bateries no són nous en absolut, consisteix en un rotor molt lleuger que gira a l'ordre de deu milers d'rpm. El concepte de les bateries inercials compleix moltes de les especificacions desitjades per l'emmagatzematge d'energia dels vehicles elèctrics, alta energia específica, alta potència específica, cicles de vida llargs, alta eficiència, recàrrega ràpida i no contaminant.

La base del seu funcionament és el següent, emmagatzemen energia cinètica la qual transformen en energia elèctrica mitjançant motors de contínua o motors de reluctància commutada (SRM). Aquesta energia és la que posteriorment alimenta els motors del vehicle.

No obstant encara és un sistema que està sota desenvolupament i presenta obstacles que en dificulten l'aplicació, com l'energia que s'alliberaria en cas de que es trenqués el dispositiu, que podria malmetre el sistema. [2]

### 4.2.5. Les bateries del CAT-07e.

Les bateries escollides pel CAT-07e són de tecnologia Liti-Polímer, un canvi respecte les del CAT-06e, que eren de Liti-FePO<sub>4</sub>. Aquesta tecnologia proporciona una major energia específica que l'anterior i a més a més és molt més lleugera i ocupa menys volum.

Les bateries de Li-Po són essencialment bateries de Li-ió. Utilitzen un mateix material per l'ànode així com pel càtode i contenen aproximadament la mateixa quantitat d'electròlit.

Encara que les característiques són semblants, les de Li-Po són úniques en el fet de que un electròlit microporós reemplaça el tradicional separador porós. Aquest electròlit passa a ser el catalitzador que realça la conductivitat elèctrica. Això provoca que les bateries de Li-Po

ofereixin una major energia específica i que siguin més primes que les de Li-ió convencionals. No obstant això el seu preu és entre un 10 i un 30 % major.

Les bateries triades pel CAT-07e són el model SLPBA843126 del fabricant Melasta [3] de 6,35 Ah de 3,7 V nominals i que pot descarregar a un màxim de 15 C.

Segons la normativa de la Fórmula Student per vehicles elèctrics [4] el sistema de bateries no pot sobrepassar els 600 V, valor que ens interessa aconseguir ja que al voler la màxima potència, el fet d'estar a màxim voltatge disminueix les pèrdues per efecte joule. També s'ha de tenir en consideració que a mesura que el voltatge disminueix, el corrent augmentarà i si es vol aconseguir una potència màxima amb un valor de tensió de bateries mitjanament baix, les cel·les hauran de permetre corrents de descàrrega elevats, com és el cas d'aquest model que permet fins a 15 C màxims nominals de descàrrega. A partir del dimensionat de les bateries realitzat en altres treballs, s'ha extret que es necessiten 7kWh per completar la prova de l'endurance, aconseguits mitjançant una configuració de 142s2p, és a dir, s'han connectat 142 grups en sèrie de dues cel·les en paral·lel.

La *Figura 4.5* mostra les cel·les del CAT-07e



Figura 4.5 Cel·les del CAT-07e

#### 4.2.6. Model de les bateries en MATLAB Simulink

Per modelitzar les bateries primer s'ha de conèixer el model d'una cel·la.

Segons [5], s'ha desenvolupat un model de simulació dinàmic per aquest tipus de bateries consistent en una font de tensió controlada, una resistència interna i l'equació de la dinàmica pròpia de la cel·la. Es pot apreciar l'esquema en la Figura 4.6

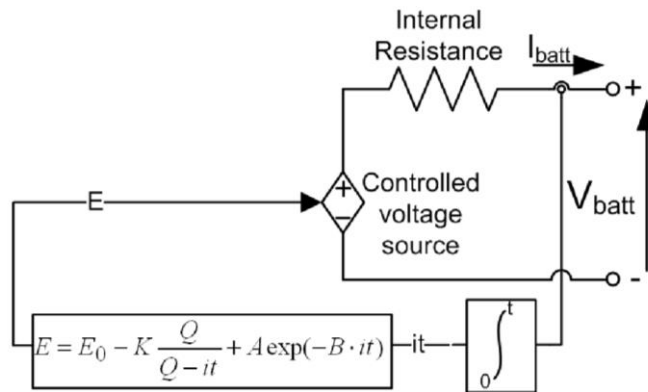


Figura 4.6 Model dinàmic d'una bateria d'ió-liti

L'equació de la dinàmica de la cel·la

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} + A e^{(-B \cdot it)} \quad (\text{Equació 4.1})$$

On:

E

És la tensió en V sense càrrega, resultat de l'Equació 4.1.

I els diferents paràmetres que la componen es poden extreure a partir de la corba de descàrrega de la cel·la, de la Figura 4.7.



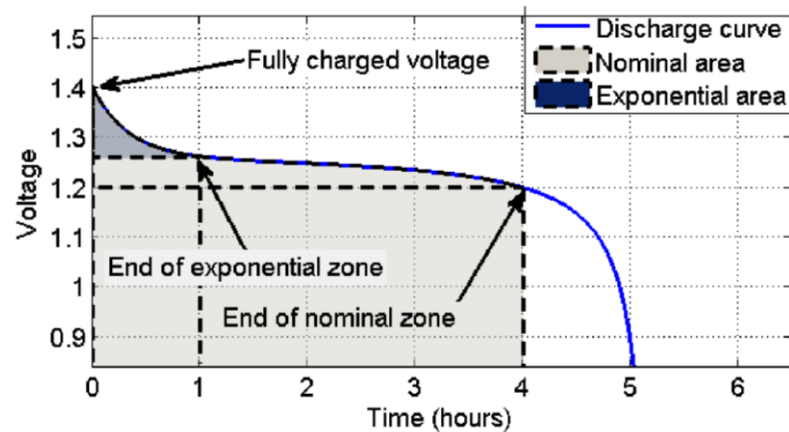


Figura 4.7 Zones característiques de la corba de descàrrega

On :

A

Representa l'ample de la zona exponencial de la corba en V, es calcula com la resta del voltatge a plena càrrega i el voltatge al final de la part exponencial de la corba.

B

Inversa de la constant de temps de la zona exponencial (A·s)<sup>-1</sup>, es calcula seguint l'Equació 4.2.

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (\text{Equació 4.2})$$

On  $Q_{exp}$  és la càrrega al final de la part exponencial.

K

Voltatge de polarització en V, la seva expressió ve donada per l' Equació 4.3.

$$K = \frac{(E_{full} - E_{nom} + A(\exp(-B \cdot Q_{nom}) - 1)) \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (\text{Equació 4.3})$$

On  $E_{full}$  és el voltatge de la cel·la en V carregada al 100%,  $E_{nom}$  és el voltatge de la cel·la en

$V$  al final de la zona nominal i  $Q_{nom}$  és la càrrega de la cel·la al final de la zona nominal en A·s.

$Q$

Capacitat de la bateria es mesura en A·s, ve donada pel fabricant.

$\int i dt$

És la integral del corrent en el temps.

$E_0$

Tensió constant de la bateria en V, ve donada per l'Equació 4.4

$$E_0 = E_{Full} + K + Ri - A \quad (\text{Equació 4.4})$$

On  $R$  és la resistència interna de la cel·la en Ohms.

Els valors calculats a partir de la corba de descàrrega proporcionada pel fabricant són:

$$E_0 = 3,82 \text{ V} ; Q = 6,35 \text{ A}\cdot\text{h} ; A = 0,3 \text{ V} ; B = 0,0006555 \text{ (A}\cdot\text{s)}^{-1} ; K = 0,03529 \text{ V} ; R = 0,002 \Omega$$

Un cop s'han calculat tots els paràmetres necessaris per modelar la cel·la ja es pot implementar amb el programa MATLAB Simulink i fer-ne simulacions.

## 4.3. El convertidor

### 4.3.1. Introducció als convertidors

La funció principal d'un convertidor és transformar un senyal de tensió i corrent d'entrada en un altre de sortida diferent. Això és possible gràcies a la commutació estàtica de transistors que s'obren i es tanquen de manera controlada convertint el senyal rebut en el desitjat.

Existeixen quatre tipus de convertidors:

- Convertidor CC/CC o chopper. Varia el senyal que rep una càrrega en corrent continu.
- Convertidor CC/AC o inversor. Transforma el senyal que li arriba en corrent continu a corrent altern
- Convertidor AC/CC o rectificador. Realitza la funció contrària de l'inversor.
- Convertidor AC/AC o convertidor de freqüència. Converteix el corrent altern d'una freqüència a corrent altern d'una altra. [7]

Com que la font de tensió és en corrent continu i els motors són trifàsics alterns, el vehicle precisa d'inversors per poder alimentar correctament els motors.

### 4.3.2. Els inversors del CAT-07e

Com ja s'ha comentat, els convertidors del CAT-07e són del tipus DC/AC o inversors i n'hi ha un per cada motor.

Cada inversor conté tres branques de dos transistors IGBT en cada una d'elles que realitzen la commutació.

Els inversors del CAT-07e estan disposats en el monoplaça en un empaquetament propi d'inversors on hi ha les branques d' IGBT's i els busos de contínua així com un sistema de refrigeració per dissipar la calor generada degut a les pèrdues. La *Figura 4.8* representa el disseny en 3D dels inversors del CAT-07e



Figura 4.8 Els inversors del CAT-07e

### 4.3.3. Model dels inversors

El model dels inversors del CAT-07e així com del seu control en la seva totalitat i de manera detallada escapa de l'abast d'aquest projecte, per tant el model s'ha simplificat de manera que tot i que no sigui exacte realitzi la mateixa funció; a partir del senyal de control enviat pel modulador transformar el senyal provinent de les bateries en el senyal que necessiten els motors per aconseguir l'objectiu fixat pel conductor.

Les entrades del bloc de l'inversor són la tensió  $U_{dc}$  provinent de les bateries, el senyal de les intensitats  $i_d, q$  del motor i el senyal  $m_d, q$  del modulador.

Les tensions que l'inversor transforma per alimentar el motor es calculen segons l'equació

$$u_{d,q} = U_{dc} \cdot m_{d,q} \quad (\text{Equació 4.5})$$

I són les tensions en les coordenades resultants de la transformada de Park.

Les intensitats d'entrada  $i_d, q$  s'utilitzen per poder calcular la intensitat en contínua de l'inversor. Fent la suma d'aquestes intensitats en contínua dels dos inversors donen com s'ha vist anteriorment el valor de la intensitat de bateries.

Si es suposa que es conserva la potència, es pot igualar la intensitat de bateries amb la dels inversors utilitzant l'expressió

$$U_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2} (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (\text{Equació 4.6})$$

I desenvolupant aquesta expressió es pot igualar la intensitat en contínua amb la en coordenades  $d, q$ .

$$U_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{3}{2} (U_{dc} \cdot m_d \cdot i_d + U_{dc} \cdot m_q \cdot i_q) \quad (\text{Equació 4.7})$$

$$I_{dc} = \frac{3}{2} (m_d \cdot i_d + m_q \cdot i_q) \quad (\text{Equació 4.8})$$

Al tenir dos inversors s'haurà d'implementar dos blocs d'inversors. L'obtenció del senyal del modulador s'explica en el capítol del llaç de control i la del senyal  $i_d, q$  s'explica ara a continuació en el model del motor.

## 4.4. El Motor

En aquest apartat es fa una petita introducció als diferents tipus de motors d'imants permanents que existeixen, el seu funcionament, es fa èmfasi en els motors del CAT-07e, que són síncrons, i finalment s'explica el seu model amb MATLAB Simulink.

### 4.4.1. Introducció al motor d'imants permanents

En primer lloc cal diferenciar si el motor és de corrent continu o de corrent altern, Segons [8] es divideixen aquests dos grups en PMDC i PMAC (Permanent Magnet Direct Current / Permanent Magnet Alternating Current)

Pel cas que interessa, estudiarem els PMAC, subdividint-los en BLDCM i PMSM. Els motors BLDCM són els anomenats Brushless DC Motors, els quals no tenen escombretes. També es solen classificar així per la forma trapezoïdal de la força contraelectromotriu que es genera en els debanats de l'estator quan el rotor gira.

Els motors PMSM o Permanent Magnet Synchronous Motor, són els que interessen. També se'ls coneix com motors sinusoïdals ja que la forma de l'ona de la força contraelectromotriu que es genera en els seus debanats de l'estator quan el rotor gira és sinusoïdal.

Aquests PMSM es subdivideixen en els SPMSM i els IPMSM. El SPMSM o Surface Permanent Magnet Synchronous Motor és conegut com el motor de pols llisos, i el IPMSM o Interior Permanent Magnet Synchronous Motor és conegut com motor de pols sortints. Les equacions que modelen els SPMSM són un cas concret dels IPMSM i la seva diferència és que el motor de pols llisos té els imants permanents muntats en la superfície del rotor, mentre que el motor de ports sortints és els imants muntats en l'interior del rotor, d'aquí li ve el nom. Això implica a l'hora d'implementar les equacions, que el valor de les inductàncies en coordenades  $d,q$  (explicat en el punt 4.4.3) en el cas del motor de pols llisos serà el mateix, la qual cosa simplificarà els càlculs com es veurà més endavant.

El rotor està format per un imant permanent, el qual crea el flux magnètic. Això implica que no sigui necessària ni una estructura d'espores en curtcircuit ni la generació mitjançant alimentació externa. Com a comentari afegir que els materials més utilitzats en la fabricació d'imants són el Neodimi-Ferro-Bor (NdFeB) i el Samari-Cobalt (SmCo).

#### 4.4.2. Els motors del CAT-07e

Els motors del CAT-07e són motors PMSM de tipus SPMSM model d'alimentació trifàsica Ma-55 del fabricant Mavilor. Les característiques principals que van fer decidir a l'equip per aquest model i aquesta tecnologia van ser que aquest tipus de motors presenten una major densitat de potència ja que tenen una relació potència-pes molt bona, és a dir, són motors petits per la gran potència que poden desenvolupar. En la *Figura 4.9* es pot veure la representació gràfica dels motors.



Figura 4.9 Motors Ma-55 del CAT-07e

També és ideal la relació parell/inèrcia que proporcionen, la qual és elevada en comparació amb els altres motors així com l'ampli rang de velocitats d'operació que permet. A més a més, els motors que propulsen el monoplaça van ser modificats específicament per l'equip, afegint una refrigeració per líquid.

El seu funcionament és el mateix que el de qualsevol motor síncron. Són necessaris dos camps magnètics que interactuïn entre ells, l'inductor i l'induït. En el cas dels motors, l'inductor és el camp creat pel bobinat de l'estator i l'induït, el camp creat pels imants del rotor. A l'alimentar el bobinat inductor amb un corrent altern es crea un camp magnètic rotatiu al voltant del rotor, de manera que el camp magnètic rotòric tendeix constantment a alinear-s'hi i d'aquesta manera fa possible el gir.

### 4.4.3. Model dels motors

#### Model matemàtic

Modelar i simular el comportament dinàmic dels motors síncrons d'imants permanents fent ús de les equacions diferencials del sistema trifàsic pot resultar molt complex. Per simplificar els càlculs i la implementació del sistema s'ha efectuat dues transformacions, les transformades de Park i Clarke que són un canvi de referència.

Per introduir el model del motor en primer lloc s'analitzen les equacions que en descriuen el seu funcionament. Per fer-ho, es suposa que la distribució espacial dels debanats per fase de l'estator és sinusoidal, per tant la força contraelectromotriu produïda per l'estator es considera sinusoidal. També que no existeix cap efecte tèrmic sobre les resistències de l'estator ni sobre l'imant permanent i que el material magnètic es suposa lineal, que no té saturació i que no hi ha pèrdues en el ferro de la màquina.

Segons [5], considerant aquestes suposicions s'obtenen les equacions del voltatge pel bobinat de l'estator. Les equacions en forma matricial són les de l'Equació 4.9 on el subíndex s indica que es refereixen a l'estator

$$V_{abcs} = R_s \cdot I_{abcs} + \frac{d}{dt} \lambda_{abcs} \quad (\text{Equació 4.9})$$

On el vector  $V_{abcs}$  és el voltatge de l'estator per fase,  $R_s$  és la matriu de resistències de les bobines de l'estator,  $i_{abcs}$  és el vector de corrents per fase de l'estator i  $\lambda_{abcs}$  és el vector del flux concatenat del estator. Aquests vectors i matrius són definits com els següents:

$$V_{abcs} = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; R_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; I_{abcs} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \lambda_{abcs} = \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{Equació 4.10})$$

El flux concatenat de l'estator en part és creat pel mateix flux de l'estator i en part pel flux dels imants permanents del rotor. Per aquest motiu existeixen dos subíndex diferents, el r (rotor) i el s (estator). El flux concatenat creat per l'estator s'obté de la matriu d'inductàncies de les bobines de l'estator i el vector corrent de l'estator. El flux concatenat creat pel rotor s'obté d'un vector que contempla l'angle elèctric del rotor ( $\theta_r$ ) i l'amplitud del flux vist des de l'estator, que és creat pels imants del rotor ( $\lambda_m$ ). Les equacions que defineixen el flux concatenat i el rotor es mostren a continuació, on l'Equació 4.12 defineix el flux creat per l'estator i l'Equació 4.13 defineix el flux creat pel rotor.



$$\lambda_{abcs} = \lambda_{abcs(s)} + \lambda_{abcs(r)} \quad (\text{Equació 4.11})$$

$$\lambda_{abcs(s)} = \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} \end{bmatrix} \cdot I_{abcs} \quad (\text{Equació 4.12})$$

$$\lambda_{abcs(r)} = \lambda_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{Equació 4.13})$$

Segons [8] les auto inductàncies i les inductàncies de les bobines del rotor són resumides en les equacions Equació 4.14 i Equació 4.15 respectivament, on les inductàncies són funció de la posició del rotor o angle elèctric del rotor.

$$\begin{aligned} L_{aas} &= L_{ls} + L_A - L_B \cos(2\theta_r) \\ L_{bbs} &= L_{ls} + L_A - L_B \cos(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{Equació 4.14})$$

$$L_{ccs} = L_{ls} + L_A - L_B \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3})$$

$$\begin{aligned} L_{abs} &= L_{bas} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{acs} &= L_{cas} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{Equació 4.15})$$

$$L_{bcs} = L_{cbs} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r)$$

El terme  $L_{is}$  és la inductància de dispersió (les línies de flux que es tanquen sense passar per una altra bobina, pèrdues des del punt de vista del flux) i és la mateixa per cada una de les fases de l'estator. Els termes  $L_A$  i  $L_B$  són les inductàncies de les bobines, que venen donades per:

$$L_A = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l \varepsilon_1$$

$$L_B = \frac{1}{2} \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l \varepsilon_2 \quad (\text{Equació 4.16})$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{g_{min}} + \frac{1}{g_{max}} \right); \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{g_{min}} - \frac{1}{g_{max}} \right)$$

Les dades que contempla l'Equació 4.16 són: el nombre de voltes de les bobines ( $N_s$ ), el radi des del centre fins el centre de circumferència interior de l'estàtor ( $r$ ), la longitud axial de l'entreferro ( $l$ ),  $\mu_0$  correspon a la permeabilitat de l'aire, i les  $\varepsilon$  són definides amb el gruix màxim i el mínim de l'entreferro.

L'equació final és:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \lambda_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \right) \quad (\text{Equació 4.17})$$

Aquest sistema presenta diverses dificultats, el sistema no és lineal, hi ha termes que depenen de l'angle  $\theta_r$ , hi ha dificultats per calcular el parell i el sistema no és apte per l'anàlisi.

És necessari resoldre els problemes per poder analitzar-ne els resultats i obtenir el model correcte del motor. El primer problema a resoldre la dificultat que presenten les equacions per calcular el parell.

Per obtenir parell constant el flux creat per l'estator també ha de girar, així com el flux de l'imant gira amb el rotor. Per a que el flux sigui giratori s'han de crear tres corrents sinusoidals

en l'estator desfasades  $120^\circ$ .

Existeix, però, una altra dificultat, la dependència amb els termes de l'angle  $\theta_r$ .

És imprescindible resoldre aquest últim problema plantejat ja que al eliminar-lo s'aconseguirà obtenir uns termes que no dependran de l'angle  $\theta_r$ . Un cop desapareguda aquesta dependència quedaran resolts altres problemes com l'obtenció d'un parell constant així com la seva expressió, l'obtenció d'un sistema d'equacions diferencials lineal i un sistema apte per l'anàlisi.

Finalment es tindrà un model del motor que serà representat per unes equacions senzilles d'analitzar i tractar. Per poder complir aquest objectiu s'ha de transformar l'Equació 5.15) amb les transformacions matricials de Clark i Park explicades, ara sí, a continuació.

### Transformades de Clarke i Park

El vector de corrents  $I_s$ , com es veu en la *Figura 4.10*, és un vector format per tres components sinusoidals, les quals estan englobades en un pla format pels eixos  $a, b, c$  que no són ortogonals. Amb l'objectiu de simplificar el sistema a un d'ortogonal es realitza la transformada de Clarke. Aleshores es passa a tenir un vector amb dues components,  $\alpha$  i  $\beta$  ja que la tercera component passa a ser zero.

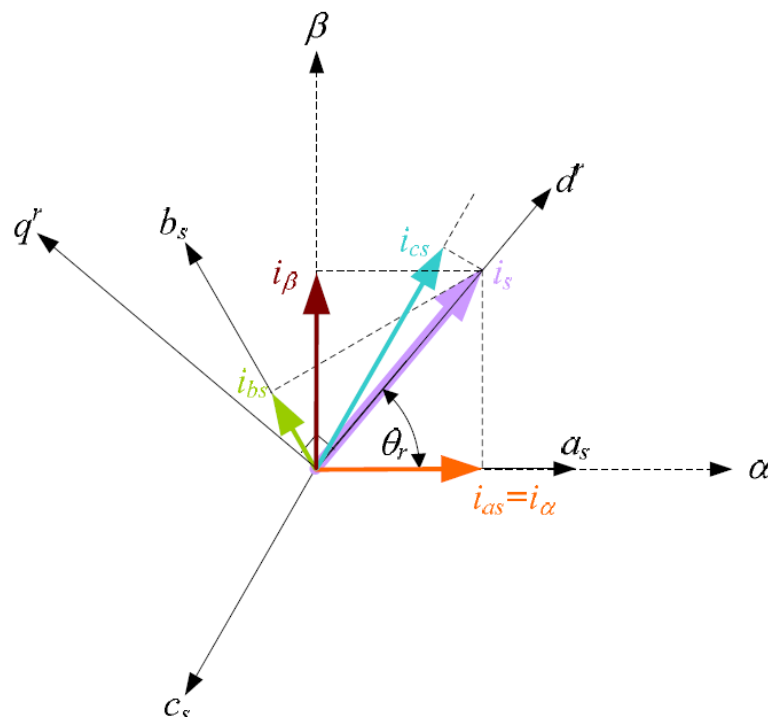


Figura 4.10 Coordenades abc i dq

Les equacions que s'utilitzen per dur a terme aquesta transformada són les següents.

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \left( i_a - \frac{1}{2} \cdot i_b - \frac{1}{2} \cdot i_c \right)$$

$$i_0 = i_a + i_b + i_c = 0$$

(Equació 4.18)

$$i_\beta = \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_c \right)$$

$$i_0 = 0$$

$$i_\alpha = i_a$$

(Equació 4.19)

$$i_\beta = \frac{2 \cdot i_b + i_a}{\sqrt{3}}$$

La transformada de Clarke ha convertit un sistema trifàsic de corrents a  $120^\circ$  en un pla, a un sistema trifàsic ortogonal. A més a més, es una transformada que no modifica el mòdul del vector. Això no obstant, no resol el problema de la dependència de l'angle  $\theta_r$ .

S'elimina la dependència fent girar tot el sistema de referència  $\alpha$  i  $\beta$ , amb l'angle  $\theta_r$ . Per aconseguir-ho s'aplica una matriu de gir.

$$\rho(\theta_r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ 0 & -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad \text{(Equació 4.20)}$$

La transformada de Park és la combinació de les dues accions anteriors. Passa d'un sistema trifàsic ortogonal que gira en sincronisme amb el  $\theta_r$  del rotor. Aquesta transformada es pot aplicar en forma matricial a qualsevol variable  $v$  i  $i$ .

$$i_{odq} = P(\theta_r)^{-1} \cdot i_{abcs}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{Equació 4.21})$$

Efectuant la transformada s'obté finalment el sistema Equació 4.22

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_r L_q \\ 0 & \omega_r L_d & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_r \lambda_m \end{bmatrix} \quad (\text{Equació 4.22})$$

Amb

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B); \quad L_q = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (\text{Equació 4.23})$$

Es pot expressar el sistema anterior amb les següents expressions.

$$\begin{aligned} v_{0s}^r &= r_s i_{0s}^r + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{0s}^r \\ v_{ds}^r &= r_s i_{ds}^r + L_d \frac{d}{dt} i_{ds}^r - \omega_r L_q i_{qs}^r \\ v_{qs}^r &= r_s i_{qs}^r + L_q \frac{d}{dt} i_{qs}^r - \omega_r L_d i_{ds}^r + \omega_r \lambda_m \end{aligned} \quad (\text{Equació 4.24})$$

Els subíndex s indiquen que les tensions i corrents són de l'estator i el superíndex r que està referenciat al rotor ( $\theta_r$ ). Amb les equacions anteriors s'aconsegueix un sistema que representat de manera esquemàtica equivaldria a la *Figura 4.11*.

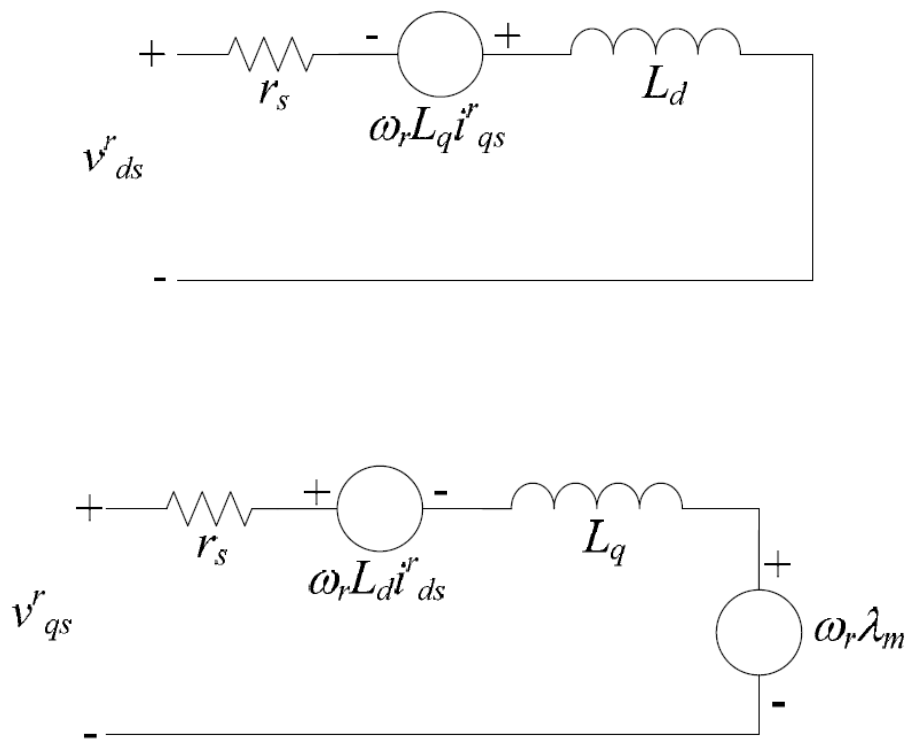


Figura 4.11 Esquema del sistema en coordenades dq

Un cop transformat el senyal, es pot obtenir l'expressió del parell que desenvolupa el motor. Per fer-ho es parteix de l'expressió de la potència elèctrica

$$p_e = \frac{3}{2} (v_{ds}^r i_{ds}^r + v_{qs}^r i_{qs}^r) \quad (\text{Equació 4.25})$$

On aquesta potència es pot subdividir en tres parts; les pèrdues en els conductors, la variació de l'energia emmagatzemada i la que s'utilitza per la conversió d'energia respectivament, de les quals aquesta última serà la que produirà el parell.

$$p_e = \frac{3}{2} \left( r_s (i_{ds}^r)^2 + r_s (i_{qs}^r)^2 \right) + \frac{3}{2} \left( L_d \frac{d}{dt} \frac{(i_{ds}^r)^2}{2} + L_q \frac{d}{dt} \frac{(i_{qs}^r)^2}{2} \right) + \frac{3}{2} \left( \omega_r (\lambda_m i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \right) \quad (\text{Equació 4.26})$$

La potència electromagnètica es representa amb l'Equació 4.27, de la qual s'obté l'equació del parell, Equació 4.28.

$$p_{em} = \omega_{rm} T_e = \frac{3}{2} \left( \omega_r (\lambda_m i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \right); \quad \omega_r = \frac{n}{2} \omega_{rm} \quad (\text{Equació 4.27})$$

$$T_e = \frac{3n}{2} (\lambda_m i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (\text{Equació 4.28})$$

On  $\omega_{rm}$  és la velocitat mecànica del rotor,  $\omega_r$  és l'omega elèctrica del rotor o estator, ja que és un motor síncron, i la  $n$  és el nombre de pols, la qual relaciona les dues omegues. El valor 3/2 s'obté pels càlculs numèrics realitzats en la transformada de Park, la qual no és ortogonal, i per tant no es conserva la potència però sí que ho fa el mòdul dels vectors tensió i corrent, ja que la matriu de transformada és ortogonal. [8]

Amb el cas del motor de pols llisos l'equació del parell queda simplificada a

$$T_e = \frac{3n}{2} (\lambda_m i_q) \quad (\text{Equació 4.29})$$

Un cop obtinguda aquesta expressió ja es podria donar per finalitzat el model del motor.

### Model amb MATLAB Simulink

Bàsicament es tracta d'implementar les equacions anteriors amb el programa. Com que el senyal sortint dels inversors d'aquest model ja ve donat en coordenades d,q , s'utilitzaran les expressions obtingudes directament i es farà dividint el motor en dues parts, una elèctrica i una mecànica.

Els paràmetres que s'han d'utilitzar per dur a terme el model són els de la Taula 4.2

Paràmetre	Valor
<b>Resistència <math>r_s</math> (<math>\Omega</math>)</b>	0,2
<b>Inductàncies <math>L_q</math> i <math>L_d</math> (H)</b>	0,00083
<b>Flux magnètic <math>\lambda_m</math> (Wb)</b>	0,103
<b>Nombre de parell de pols <math>n</math></b>	4

Taula 4.2 Paràmetres del motor



## 4.5. Transmissió i roda

En aquest capítol s'explica com es transmet el parell des dels motors fins al terra, així com s'han modelat els elements transmissió i roda.

### 4.5.1. Les transmissions i les rodes del CAT-07e

El parell i la velocitat angular que desenvolupen els motors es transmet als eixos de les rodes mitjançant les dues transmissions independents, una per cada roda posterior.

Aquestes transmissions funcionen a partir de dues rodes dentades unides mitjançant una corretja de goma que pot ser tensada a partir de dos tensors fixats al vehicle tal i com es pot apreciar en la *Figura 4.12*. La relació de transmissió "i" és igual a 4,5.



Figura 4.12 Transmissió del CAT-07e

Pel que fa a les rodes, el CAT-07 té previst portar llantes de fibra de carboni com les de la *Figura 4.13*, les quals al pesar menys que les llantes d'alumini representen una inèrcia molt menor, i pneumàtics del fabricant Hoosier. Cal destacar el valor del coeficient de fregament,  $\mu$ , del contacte entre el pneumàtic i el terra, el qual és d'un valor que en condicions de sec oscil·la entre 2 i 2,5 molt superior al que esperaríem de qualsevol altre vehicle. Això és degut a la composició del pneumàtic, que garanteix una molt elevada adherència tot i que això pugui representar haver de consumir més energia a l'hora de fer córrer el monoplaça.



Figura 4.13 Roda del CAT-07e

#### 4.5.2. Model de la transmissió i el contacte amb el terra

La transmissió es simula de manera senzilla com un element guany, que multiplica el valor d'entrada per aquest guany.

El bloc de la transmissió tindrà com entrades el parell del motor, provinent del model de la conversió electromecànica del motor, i la velocitat angular de la roda (calculada al bloc de la roda) i en sortirà el parell de la roda i la velocitat angular del motor. Al tenir dos motors caldrà dues transmissions, una per cada roda posterior. Al model s'hi pot afegir el rendiment de la transmissió, també consistent en un bloc guany amb una constant  $\eta_{trans}$  de valor 0,95.

$$\Gamma_{roda} = \Gamma_{motor} \cdot i \cdot \eta_{trans} \quad (\text{Equació 4.30})$$

$$\omega_{motor} = \omega_{roda} \cdot i \cdot \eta_{trans} \quad (\text{Equació 4.31})$$

El parell calculat serà l'entrada del bloc de la roda, mentre que la velocitat angular calculada serà una de les entrades del motor, necessària per calcular les intensitats.

El contacte amb el terra es representa directament com la conversió a través del radi de la roda del parell a força que desenvolupa el motor, així com la transformació de la velocitat lineal de la roda en la velocitat angular de la roda. Aquesta conversió també es realitza mitjançant un guany que equival en aquest cas a dividir entre el radi de la roda.

$$F_{roda} = \frac{\Gamma_{roda}}{r_{roda}} \quad (\text{Equació 4.32})$$

$$v_{roda} = \frac{\omega_{roda}}{r_{roda}} \quad (\text{Equació 4.33})$$

On  $r_{roda}$  equival al radi de la roda amb pneumàtic inclòs.

Un cop es tenen calculats els valors de les forces que realitzen els motors, es sumen per calcular la força de tracció total que ha de desenvolupar el vehicle. Aquesta suma es realitza en un altre bloc anomenat acoblament mecànic on també a partir de la velocitat del vehicle i el radi de la corba del circuit és possible calcular les velocitats lineals de cada roda.

Els càlculs de les velocitats lineals de les rodes es realitzen a partir de les expressions següents.[6]

$$v_{roda esquerra} = \frac{R_{corba} - \left(\frac{amplevia}{2}\right)}{R_{corba}}$$
$$v_{roda dreta} = \frac{R_{corba} + \left(\frac{amplevia}{2}\right)}{R_{corba}} \quad (\text{Equació 4.34})$$

A aquesta força de tracció cal sumar-li per tenir l'evolució total de les forces la força de frenada realitzada pels frens, que en aquest cas es modela com aquella força que fa disminuir la velocitat i que es calcula en el llaç de control de la velocitat del vehicle.

Un cop realitzat tot això ja es pot passar a modelar el xassís.

## 4.6. El Xassís

El xassís és aquella estructura que sosté les diverses parts del vehicle i li dóna forma

### 4.6.1. El xassís del CAT-07e

En el cas del CAT-07e el xassís equivaldria al conjunt de les tres parts estructurals que el formen, el fons pla estructural, el monocasc i el subxassís a més a més de la carrosseria tal i com es pot observar en la *Figura 4.14*.



Figura 4.14 Carrosseria, Monocasc, subxassís i fons pla del CAT-07e

En aquest projecte no es fa èmfasi en l'estudi estructural ni de disseny del xassís, simplement s'utilitza un bloc anomenat xassís per calcular la velocitat del vehicle.

### 4.6.2. Model del xassís

El bloc del xassís com s'ha comentat té la finalitat de calcular la velocitat del vehicle i ho fa partint de la diferència de força de tracció (resultant de la suma de la força de tracció dels motors i la força de frenada) i la força resistiva que s'oposa al moviment.

Aquest sumatori de forces, aplicant l'Equació 4.35 permet calcular la velocitat del monoplaça.[2]

$$F_t - F_r = M \cdot \frac{d}{dt} v_{veh} \quad (\text{Equació 4.35})$$

Si s'aïlla la velocitat,

$$v_{veh} = \int \frac{F_t - F_r}{M} \quad (\text{Equació 4.36})$$

On  $M$  és la massa del vehicle, que equival amb pilot a 340 kg.

## 4.7. Model de les condicions de l'entorn

Ja es té tot el sistema modelat, però encara hi ha factors a tenir en compte a l'hora de poder simular el comportament dinàmic del vehicle.

Un d'aquests factors són totes aquelles forces que entren en joc quan el vehicle es mou i que van en contra del moviment ( $F_r$  en el model). En aquest projecte s'han tingut en compte les següents forces:[2]

### Força aerodinàmica de Drag i de Downforce

Tot i que a les velocitats a les que es mourà el vehicle la força aerodinàmica no sembla que hagi de ser un dels factors principals a l'hora de calcular la força resistent, s'ha cregut interessant comprovar el pes que representa i com afecta a aquest valor. Les forces de drag i downforce venen donades per les equacions

$$F_{drag} = 0.5 \cdot \rho_o \cdot C_d \cdot A_f \cdot (v_{veh} - v_a)^2 \quad (\text{Equació 4.37})$$

$$F_{downforce} = 0.5 \cdot \rho_o \cdot A_f \cdot C_l \cdot (v_{veh} - v_a)^2 \quad (\text{Equació 4.38})$$

On  $\rho_o$  és la densitat de l'aire,  $A_f$  l'àrea frontal,  $v_{veh}$  la velocitat del vehicle,  $v_a$  la velocitat de l'aire,  $C_d$  el coeficient de drag i  $C_l$  el coeficient de downforce

### Força del pes en un circuit amb pendent

Encara que en els circuits de la Fórmula Student els pendents no solen ser molt accentuats, per fer el model una mica més rigorós s'ha afegit la força del pes quan la carretera no és horitzontal. D'aquesta manera també seria possible analitzar com es comportaria el vehicle en aquest tipus de casos.

$$F_{pes} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{Equació 4.39})$$

On  $\alpha$  és el valor en graus del pendent de la carretera.

### Força de rodadura

$$F_{rodadura} = f_r \cdot N \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{Equació 4.40})$$

És la força deguda al contacte entre el pneumàtic i el terra, la seva equació ve donada per l'expressió

On N és la força normal.

Per al càlcul de la força de rodadura s'ha calculat la força normal en cada eix, de manera que la força normal en cada un és el resultant de la suma de la normal deguda al pes segons el repartiment de pesos del vehicle en condicions d'acceleració zero (60% al darrere i 40% al davant), la variació provocada per l'acceleració longitudinal del vehicle i la força de downforce també aplicada al centre de masses del vehicle.

De la suma de totes aquestes forces es calcula la força resistent  $F_r$ .

## 4.8. Model del llaç de control

A l'hora de voler realitzar simulacions per posar a prova el model i el comportament del monoplaça és necessari implementar un llaç de control que permeti dur-ho a terme. Per fer-ho s'ha invertit el model desenvolupat, creant la realimentació del sistema.

### 4.8.1. El controlador de velocitat

El controlador de velocitat fa la funció del pilot, el pilot decideix a quina velocitat vol anar el vehicle i dona el senyal per produir més força de tracció o per activar els frens.

En el model, com es pot veure a la

*Figura 4.15* s'utilitza com a senyal d'entrada la velocitat de referència (desitjada) del vehicle, la velocitat real d'aquest i la força resistent, necessària per invertir la cadena. No obstant, al voler invertir l'equació Equació 4.35 sorgeix un problema; és impossible fer-ho degut al component derivatiu. Per resoldre aquest problema és necessari utilitzar un controlador. Com que l'equació en qüestió és de primer ordre només amb un controlador proporcional  $K_p$  el sistema realimentat funciona correctament.

Pel càlcul de la constant  $K_p$  s'ha utilitzat

$$K_p = \alpha \cdot M ; \alpha = \frac{\ln(9)}{tr} \quad (\text{Equació 4.41})$$

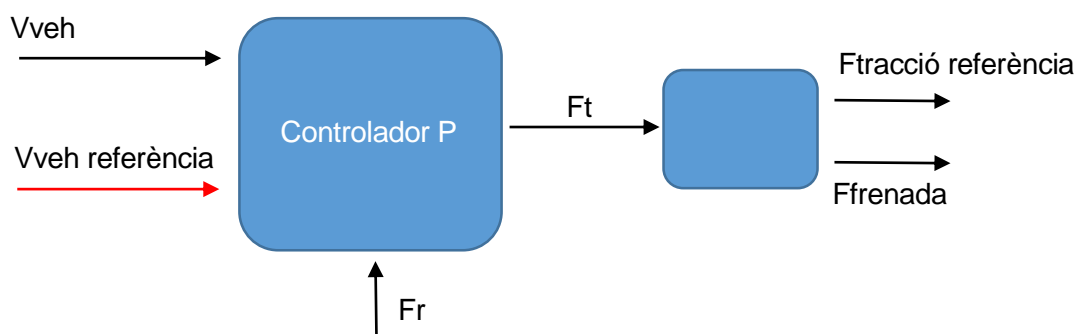


Figura 4.15 Controlador de la velocitat



El senyal sortint del controlador representa la força total de tracció del vehicle menys la força resistiva. Per tal d'obtenir només la força de tracció total cal sumar-li la força resistiva provinent de les condicions de l'entorn. Un cop aïllada la força de tracció total s'ha de diferenciar entre el senyal de l'accelerador i el senyal del fre, és a dir, la força realitzada pels motors i la realitzada pels frens.

La derivada del senyal velocitat de referència indica a quin tipus de força pertany l'acció, si és positiva o zero és la força de tracció dels motors i si és negativa és la força dels frens.

Les sortides del bloc són aquestes dues forces obtingudes. La força de tracció de referència seguirà el llaç de control mentre que la força dels frens es sumarà a la força de tracció real del sistema per tal de realitzar el cicle desitjat.

#### 4.8.2. Pas de força de referència a parell de referència

Aquest pas no presenta les complicacions de l'anterior. En primer lloc es divideix la força de tracció en dues, aquí comença la distinció de cada motor. Al no tenir en compte en el model l'efecte de l'acceleració angular, aquesta força es dividirà de manera equitativa.

Aleshores per passar de la força de tracció de referència anterior a parell de referència s'aplica

$$T_{ref} = F_{tref} \cdot \frac{r_{roda}}{i} \quad (\text{Equació 4.41})$$

En aquest punt cal aplicar la primera restricció per limitar el parell desenvolupat pel motor. Si no es vol que el monoplaça llisqui el parell efectuat no pot superar al valor de la força normal de la roda posterior multiplicat pel coeficient de fregament entre el pneumàtic i el terra i el radi de la roda, que és el màxim per a que el cotxe no derrapi, tal i com indica

$$T = N_r \cdot \mu \cdot r_{roda} \quad (\text{Equació 4.42})$$

#### 4.8.3. Pas de parell de referència a intensitat d,q de referència

Per dur a terme aquesta inversió s'utilitza l'Equació 4.28, on només es té en compte el valor de la intensitat  $i_q$ . Per calcular la  $i_d$  de referència s'utilitza una constant per imposar-la a zero. El valor d'aquestes intensitats es saturen amb la finalitat d'evitar que el corrent de bateries sobrepassi el màxim permès pel fabricant, que és de 200 A i per fer-ho s'utilitza una altra saturació dinàmica amb límit el valor màxim de  $i_q$ , calculat a partir de la tensió de les bateries, el senyal  $m_q$  i la potència màxima, 85 kW segons l'equació

$$i_{q \max} = \frac{3 \cdot 85000}{V_{bat} \cdot m_q} \quad (\text{Equació 4.43})$$

#### 4.8.4. Controlador de les intensitats

A l'hora de calcular els voltatges d,q de referència també és necessari implementar controladors. En aquest cas s'han utilitzat controladors PI de manera que resulti possible separar en dos casos diferents el càlcul del voltatge  $u_d$  i el voltatge  $u_q$  de referència. Pel càlcul dels valors de  $K_p$  i  $K_i$  s'ha utilitzat l'equació [6]

$$K_p = \alpha \cdot L \quad (\text{Equació 4.44})$$

$$K_i = \alpha \cdot r_s \quad (\text{Equació 4.45})$$

On  $L$  és el mateix valor que  $L_d$  i  $L_q$ .

I el terme  $\alpha$  es calcula a partir de l'expressió

$$\alpha = \frac{\ln(9)}{tr} \quad (\text{Equació 4.46})$$

On  $tr$  és el temps que tardarà el senyal a assolir el 90 % del valor final desitjat.

#### 4.8.5. El modulador

L'objectiu del modulador és generar el senyal que habilitarà el sistema per tal de proporcionar els voltatges i corrents necessaris per dur a terme el cicle desitjat. La implementació del modulador també s'ha adaptat als objectius del projecte ja que així com el model dels inversors, fer-ho de manera precisa i exacta escapa de l'abast d'aquest.

En aquest cas el modulador és simplement un factor en tant per u, que multiplicarà el senyal provinent de les bateries permetent calcular els valors necessaris. Per calcular aquest factor s'utilitza

$$m_{d,q} = \frac{u_{d,q}}{U_{dc}} \quad (\text{Equació 4.47})$$

On  $u_{d,q}$  és els voltatges  $d,q$  de referència i  $U_{dc}$  és el voltatge de bateries.

Aquest senyal  $m_{d,q}$  tanca el llaç de control i finalitza aquest capítol.

Finalment, s'obté el model complet llest per ser simulat.

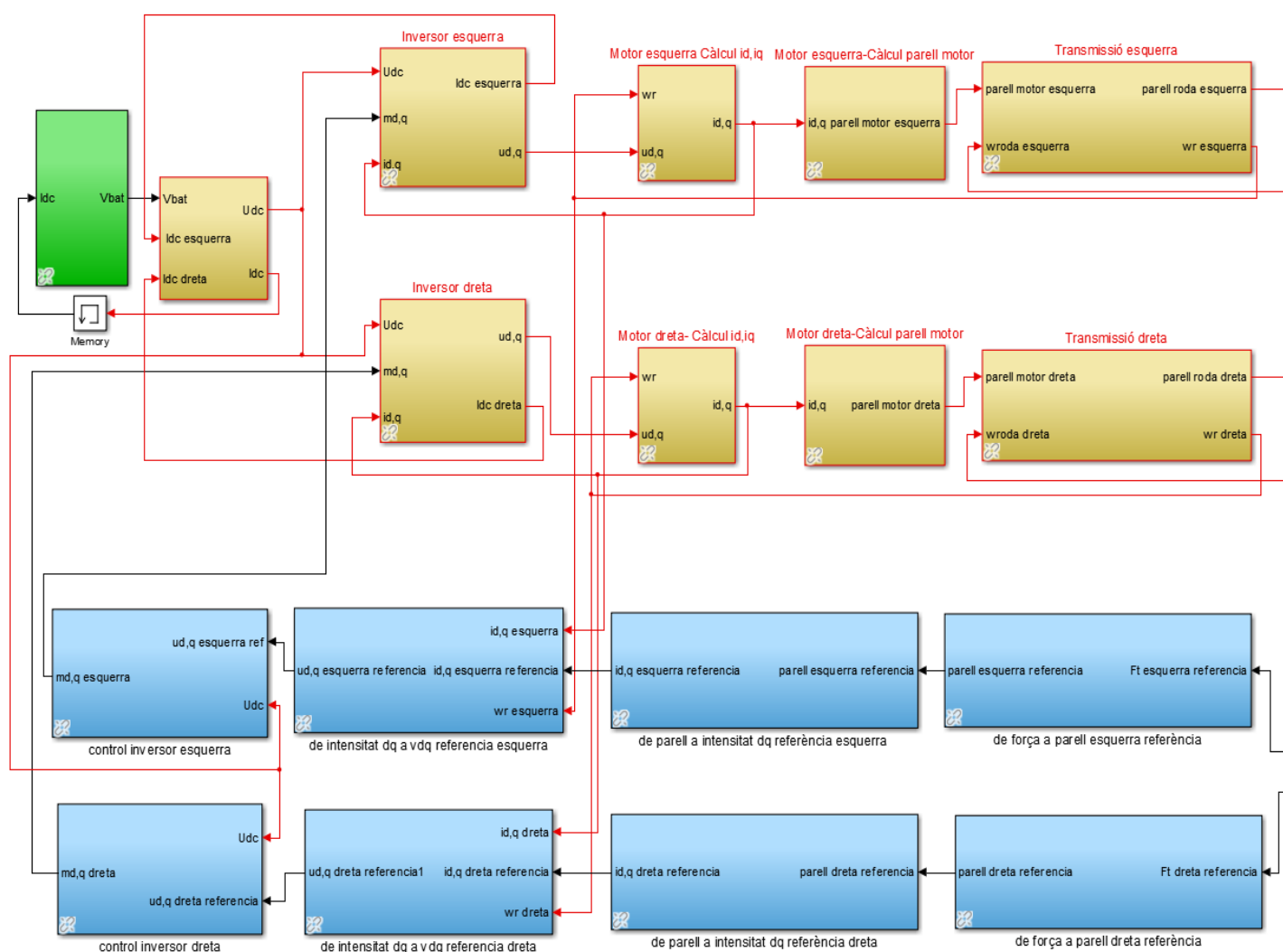
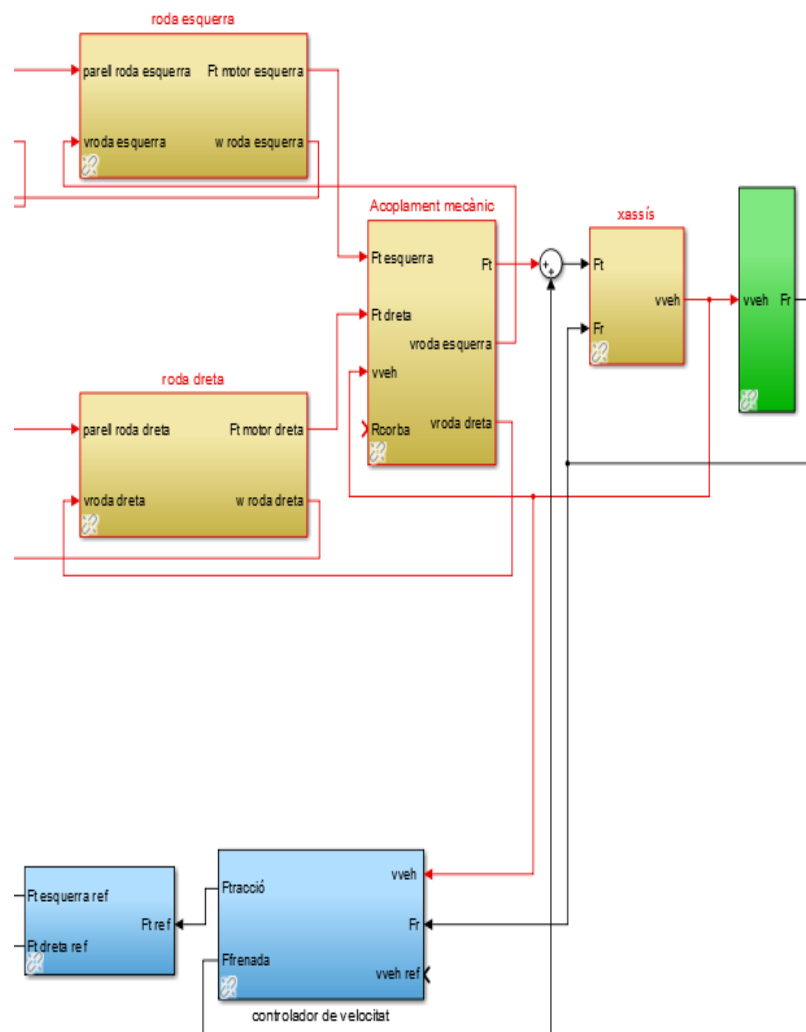


Figura 4.16 Model complet del CAT-07e



## 5. Validació del Model

Un cop realitzat el model els paràmetres necessaris per dur a terme les simulacions i que s'han de validar són els de la *Taula 5.1*

Bateries		Entorn i xassís		Motor		Transmissió i roda		Controlador	
Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
E0 (V)	3,82	M (kg)	340	rs ( $\Omega$ )	0,2	i	4,5	Velocitat	
Q (Ah)	6,35	Cd	1,3	Lq i Ld (H)	0,00083	$\eta_{trans}$	0,95	Kp	74705
A (V)	0,3	Cl	3,2	$\lambda_m$ (Wb)	0,103	rroda (m)	0,3	Intensitat	
B (As)-1	0,00065	Af (m2)	1,2	n	4	$\mu$ (superfície seca)	2	Kp	0,1823
K (V)	0,03529	ro (kg/m3)	1,22521			$\mu$ (superfície molla)	1	Ki	44
N_cells_serie	142	g (m/s2)	9,8						
N_cells_par	2	va (m/s)	0						
R ( $\Omega$ )	0,002	hg (m)	0,28						
		amplevia (m)	1,53						
		Leixos (m)	1,1075						

Taula 5.1 Taula de paràmetres del model

## 5.1. Validació del model de les bateries

Per validar el model de les bateries s'ha comparat la corba de descàrrega proporcionada pel fabricant i la corba de descàrrega obtinguda mitjançant el model realitzat.

La corba de descàrrega seleccionada és la que es produeix a 15 C.[9]

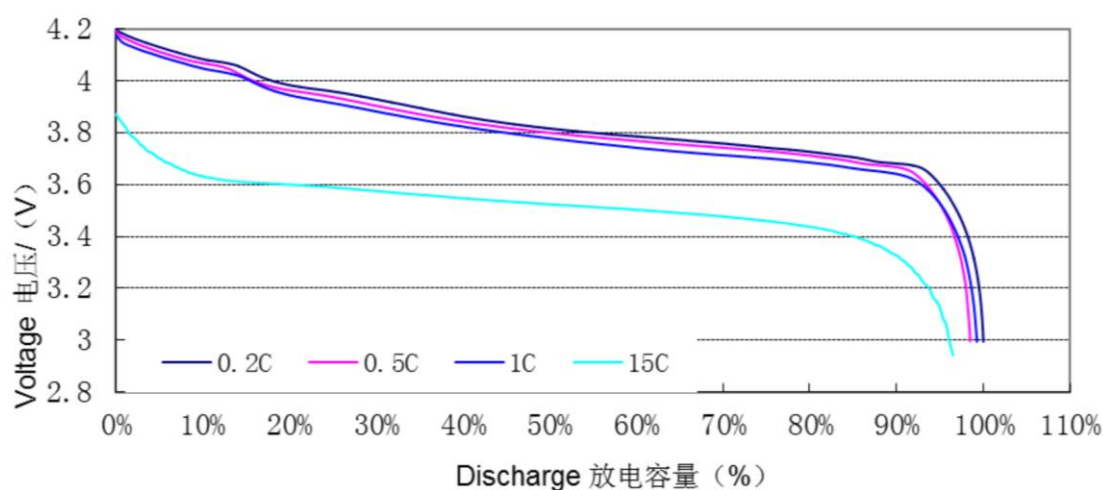


Figura 5.1 Corba de descàrrega del fabricant

La corba de descàrrega obtinguda pel model a partir dels valors calculats és la de la Figura 5.2.

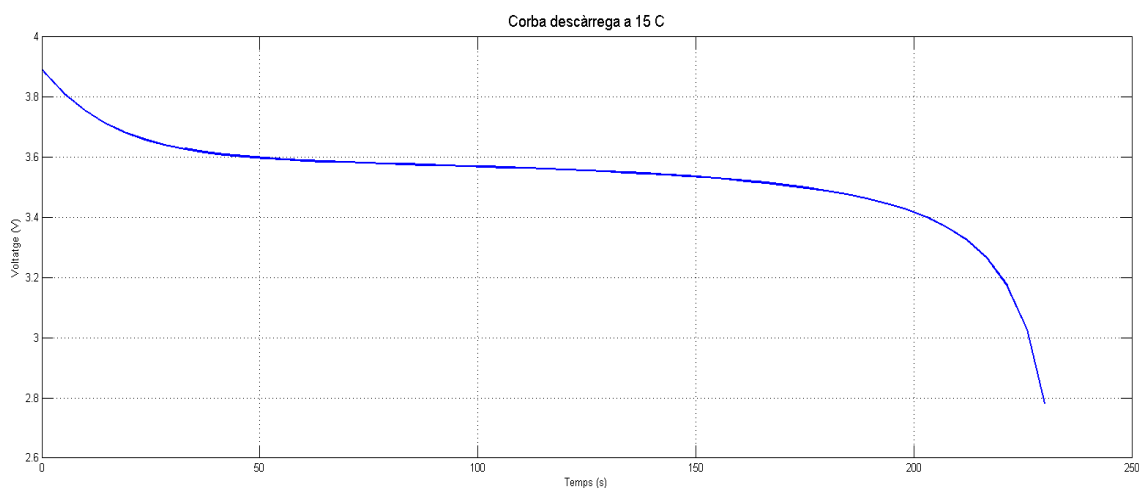


Figura 5.2 Corba de descàrrega obtinguda pel model

Es veu com les dues corbes comencen a valors una mica per sobre dels 3,8 V i com acaben aproximadament pels 2,8 V en el 100% de descàrrega.

## 5.2. Validació del model del motor

Per tal de validar el model del motor es compara el comportament del model i dels motors davant una consigna graó de 20 A i ha d'assolir el 90% d'aquest valor en 10 ms

El resultat és el de la *Figura 5.3*.

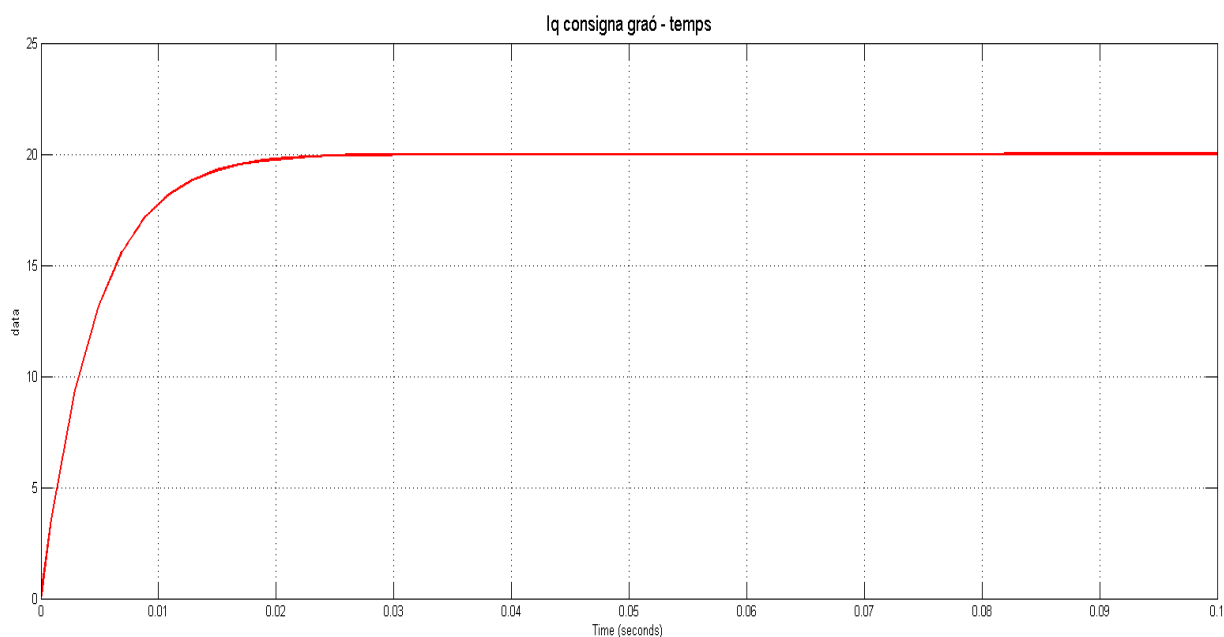


Figura 5.3 Resposta de  $I_q$  davant una consigna graó de 20 A

La intensitat del model del motor assoleix 17,8 A en un temps de 10 ms, un 89 % de la consigna.



Si s'observa ara la resposta obtinguda al banc de proves dels motors amb la mateixa entrada com en la *Figura 5.4*.

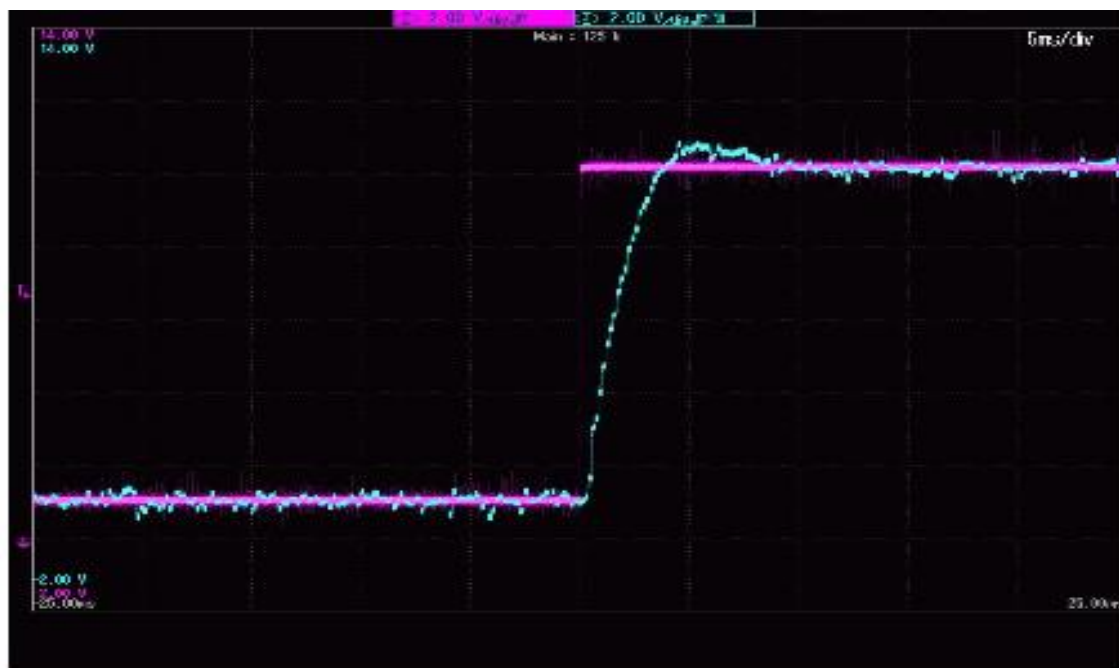


Figura 5.4 Resposta real de  $I_q$  davant una entrada graó de 20 A

Encara que a la figura 5.4 no es pot apreciar amb claredat, s'ha parlat amb els responsables del control del motor i han assegurat que el motor davant una consigna graó com la de la prova assoleix el 90 % del valor en 10 ms la qual cosa dóna validesa al model del motor.

## 6. Simulacions

En aquest capítol es detallen les simulacions de les proves de la competició Fórmula Student de manera que sigui possible extreure'n conclusions que s'expliquen en el següent capítol. Bàsicament interessa conèixer si el vehicle compleix amb el cicle de treball demanat, la tensió i corrent de les bateries així com la potència desenvolupada i l'energia consumida pel sistema. Un altre punt interessant és comprovar l'estat de càrrega de les bateries (SOC).

El desenvolupament de les proves s'ha dut a terme seguint l'horari oficial de la Fórmula Student Germany, el qual organitza els diferents esdeveniments seguint el següent horari:

Dia	Hora	Esdeveniment
29 juliol	20:00	Tendes de càrrega obertes (24 hores al dia fins el final de la competició)
1 agost	11:00 – 18:30	Skid Pad
2 agost	8:30 – 13:00	Acceleració
	13:30 – 18:30	Autocross
4 agost	8:30 – 13:00 / 13:00 – 18:30 (Depenent del resultat de les proves anteriors)	Endurance

Taula 6.1 Horari oficial de les proves de la Fórmula Student Germany 2014 [10]

On les diverses proves consisteixen en:

### Skid Pad

És la part de la competició on es posa a prova el pas per corba, el control i l'estabilitat del vehicle mentre es duu a terme un gir de radi constant.

Els cotxes entren en perpendicular a la figura de vuit i fan dues voltes senceres al cercle dret on la segona és cronometrada i seguidament dues voltes al cercle de l'esquerra també tenint en compte el temps de la segona volta, i acabant la prova sortint per l'extrem oposat d'on s'ha entrat.

### Acceleració

Posa a prova la potència del monoplaça, tracta de recórrer un trajecte recte de 75 metres en el menor temps possible. És una prova en el que interessarà comprovar els nivells de corrent, els quals estan directament relacionats amb el parell que produeixen els motors.

### Autocross

L'objectiu de l'autocross és de posar a prova la manejabilitat del cotxe mentre realitza una volta a la màxima velocitat possible per un circuit on la velocitat mitjana oscil·la entre els 40 i 50 km/h amb rectes de com a màxim 60 metres, slaloms i chicanes en un circuit d'aproximadament un kilòmetre de longitud.

### Endurance

L'edurance és la prova de resistència on es demostra la fiabilitat del vehicle. El monoplaça ha de recórrer 22 km en un circuit semblant al de l'autocross però més suau. Aquesta prova és la més important de la competició ja que dóna la oportunitat de sumar 300 punts i a més a més es realitza a la vegada la prova d'eficiència que suma 100 punts, 400 en total.

Un cop vistes les diverses proves que haurà de dur a terme el vehicle, es presenten les simulacions d'aquestes tot seguint l'horari oficial de l'organització i pensant sempre en el cas més desfavorable. Al poder carregar en qualsevol moment del dia i de la nit no s'espera tenir problemes de càrrega. L'únic cas en el qual el cotxe podria córrer sense estar al 100% del seu SOC és el dia 2 d'agost, on podria ser possible que el cotxe hagi de córrer l'autocross tot just després de realitzar la prova de l'acceleració.

## 6.1. Simulació de l'Skid Pad

Per dur a terme la simulació de l'Skid Pad en primer lloc s'ha modelat el circuit de la *Figura 6.1*. Un temps competitiu per dur a terme aquesta prova és al voltant d'uns 5,7 segons sobre superfície molla de la volta cronometrada, que és com es duu a terme a la Fórmula Student Germany, i uns 25 segons en total. La velocitat del vehicle s'ha considerat constant, a 8,5 m/s i el recorregut de la prova d'una longitud de 213 m ( $16,75 \text{ m de diàmetre mig} \cdot \pi \cdot 4$  (quatre voltes en total) + 3 metres de rectes). Degut a que la pista estarà molla s'ha considerat un coeficient de fricció més baix que en sec, en aquest cas de 1.

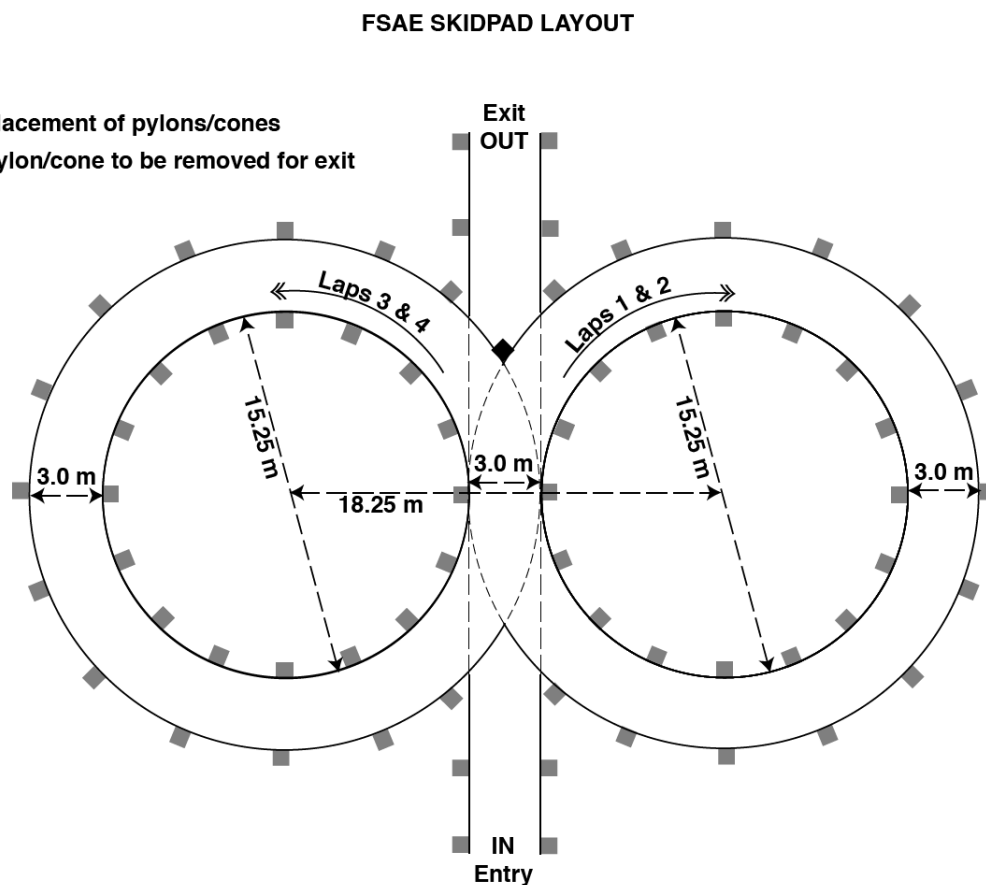


Figura 6.1 Circuit de la prova de l'Skid Pad

Introduint tots aquests paràmetres la simulació dóna els següents resultats:

### Velocitats de referència i reals

Com es pot veure en la *Figura 6.2* després de l'estat transitori d'aproximadament 1 segon les dues velocitats s'igualen i es mantenen durant la durada de la prova.

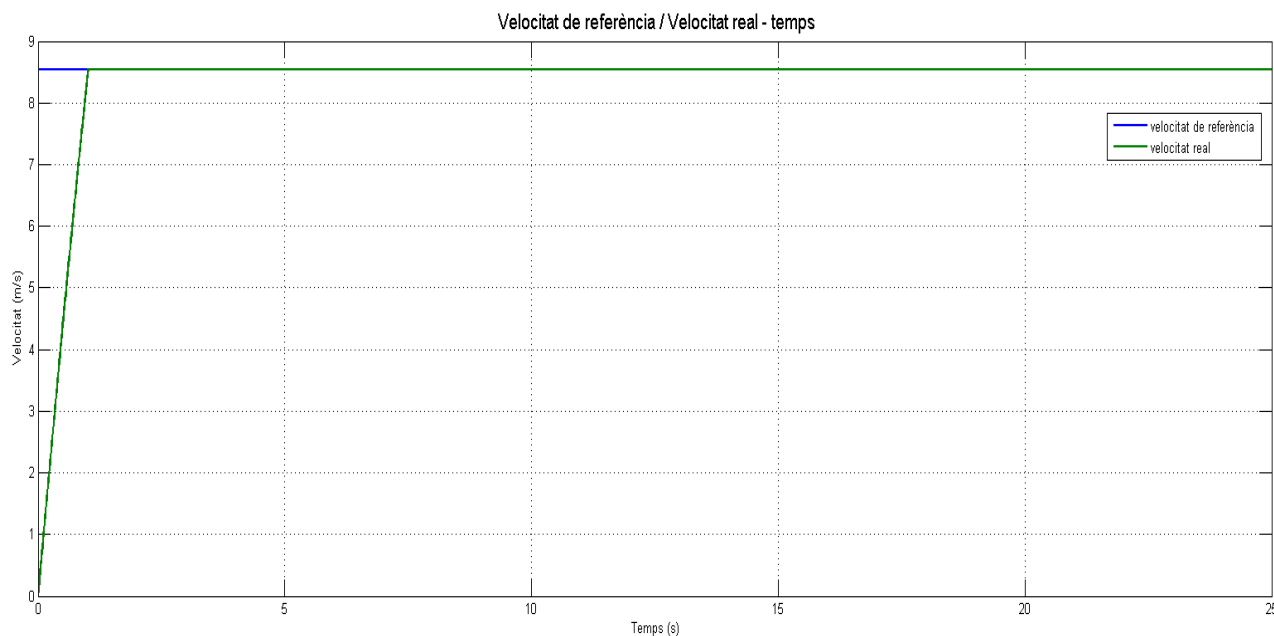


Figura 6.2 Velocitats real i de referència en l'Skid Pad

### Distància recorreguda

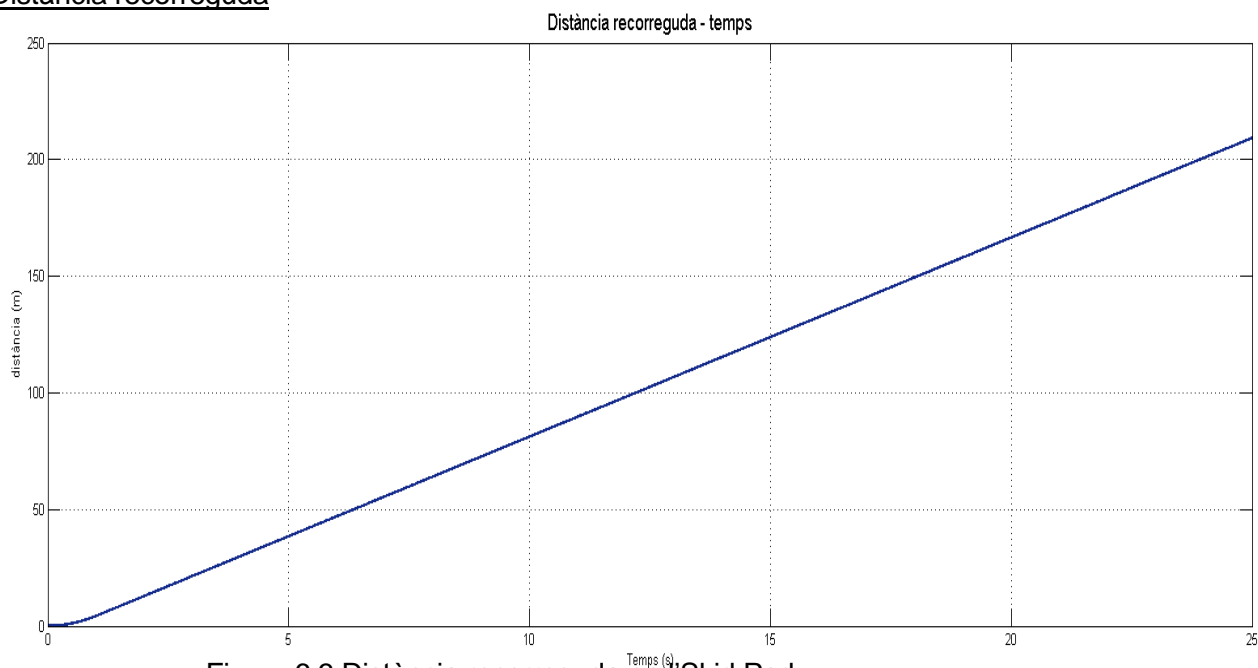


Figura 6.3 Distància recorreguda en l'Skid Pad

A partir del gràfic de la distància recorreguda, *Figura 6.3*, es pot saber si el cotxe ha acabat la prova amb el temps desitjat. Teòricament hauria d'haver recorregut els 213 m en 25 segons, la qual cosa es compleix.

L'Skid Pad és una prova de curta durada, per tant no es considera crítica en termes energètics. De tota manera sempre és interessant analitzar l'evolució del voltatge de bateries, la seva intensitat i l'evolució del SOC així com l'energia consumida.

### Voltatge de bateries

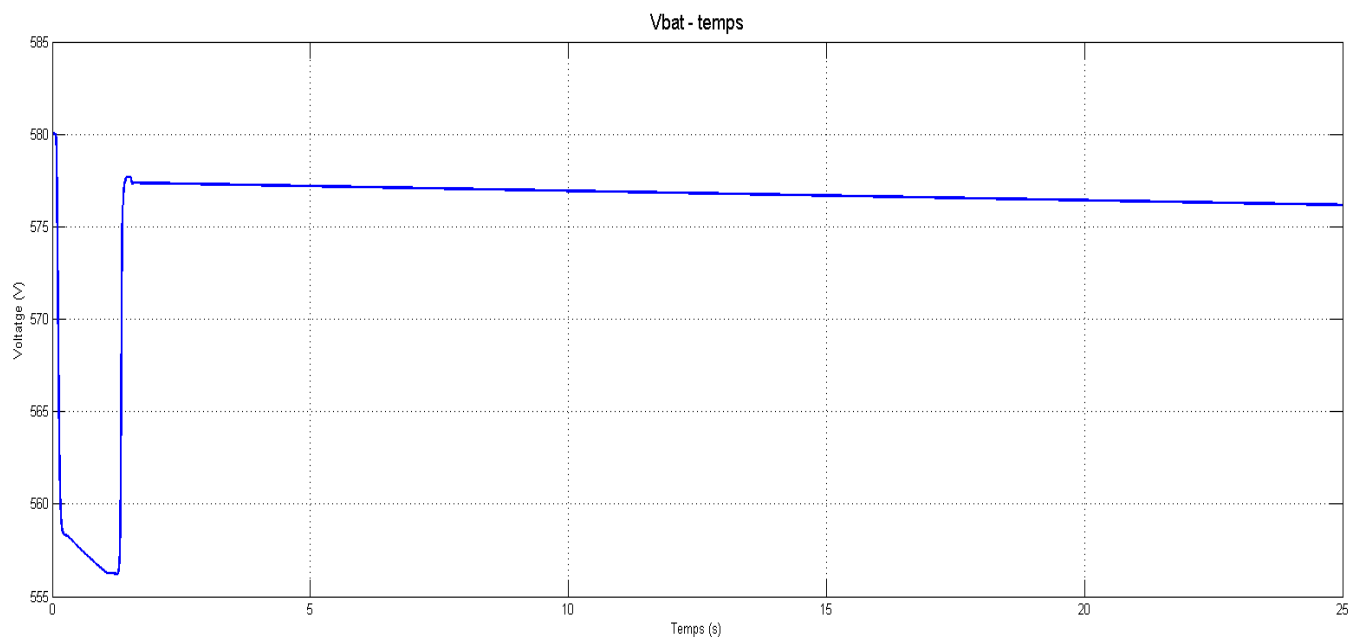


Figura 6.4 Voltatge de bateries durant l'Skid Pad

Deixant de banda l'estat transitori en que el vehicle assoleix la velocitat desitjada es pot comprovar en la *Figura 6.4* com el descens del voltatge és molt baix, la qual cosa indica que el consum no és representatiu.

### Intensitat de bateries

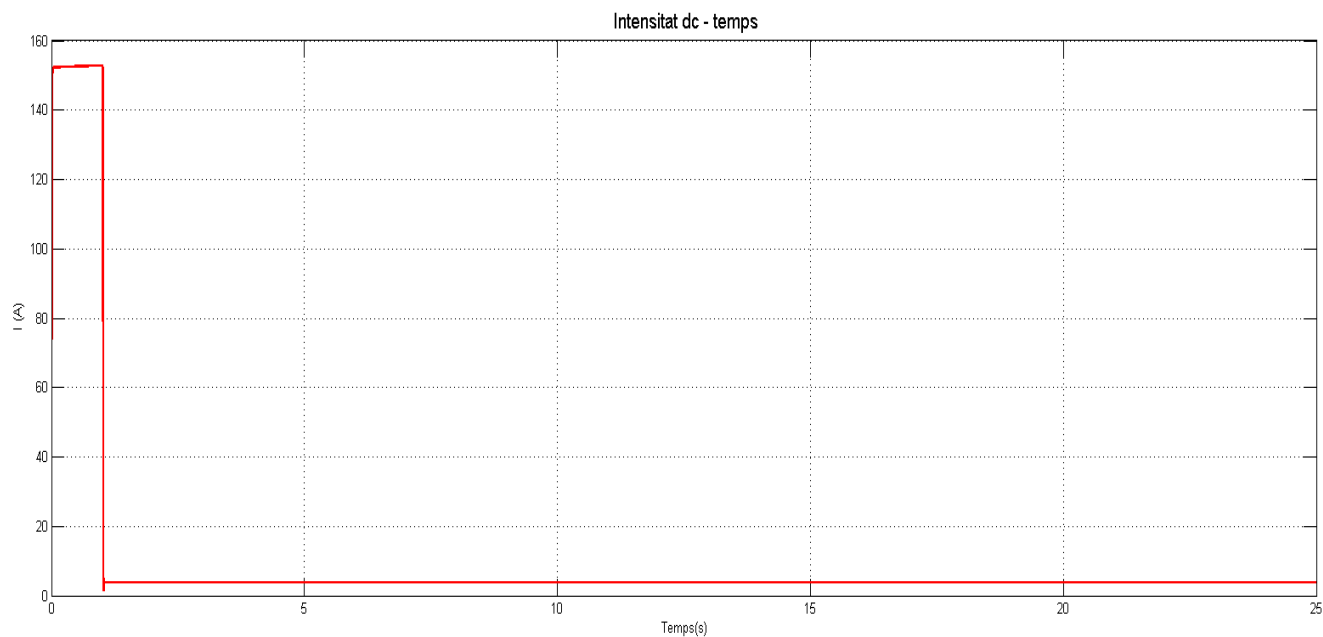


Figura 6.5 Intensitat de bateries durant l'Skid Pad

Amb el corrent de bateries, *Figura 6.5*, passa el mateix que amb el voltatge. Un cop assolida la velocitat desitjada aquest disminueix i es manté estable. En la realitat això no seria ben bé així ja que el pilot aniria rectificant la velocitat accelerant i frenant.

### Energia consumida

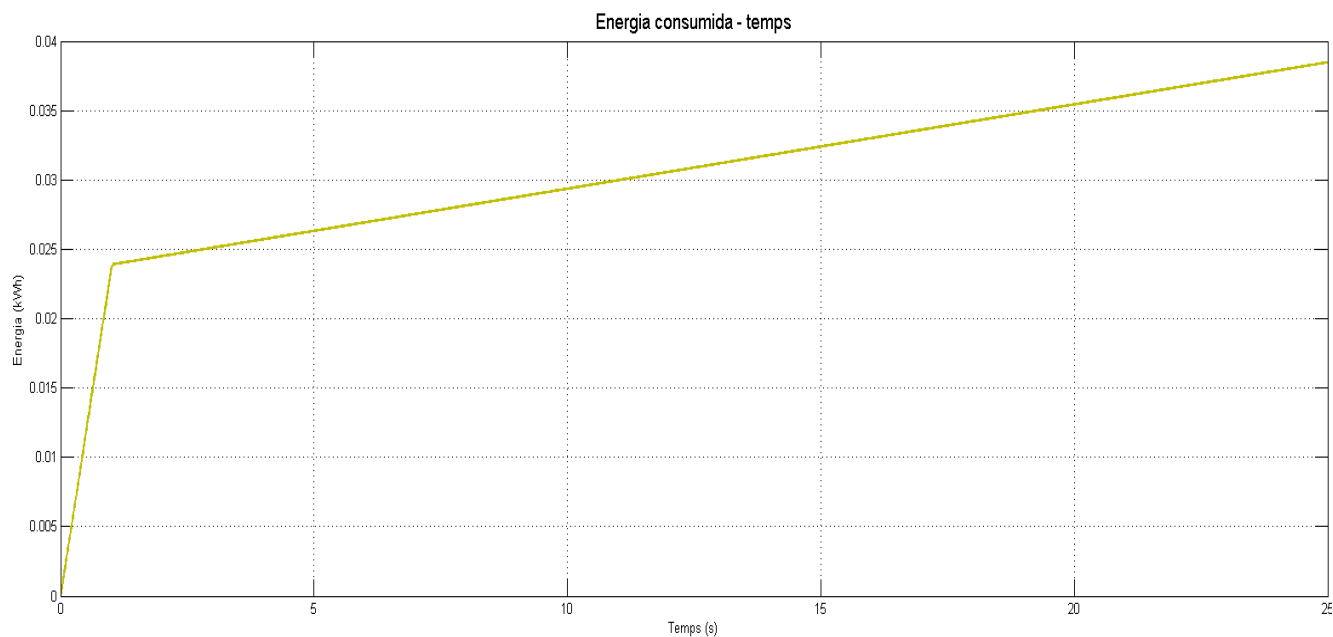


Figura 6.6 Energia consumida durant la realització de l'Skid Pad

L'energia consumida en total durant la realització d'un intent de l'Skid Pad com es veu en la *Figura 6.6* és de gairebé 0,04 kWh, molt per sota dels 6,6 kWh que contenen les bateries.

### SOC

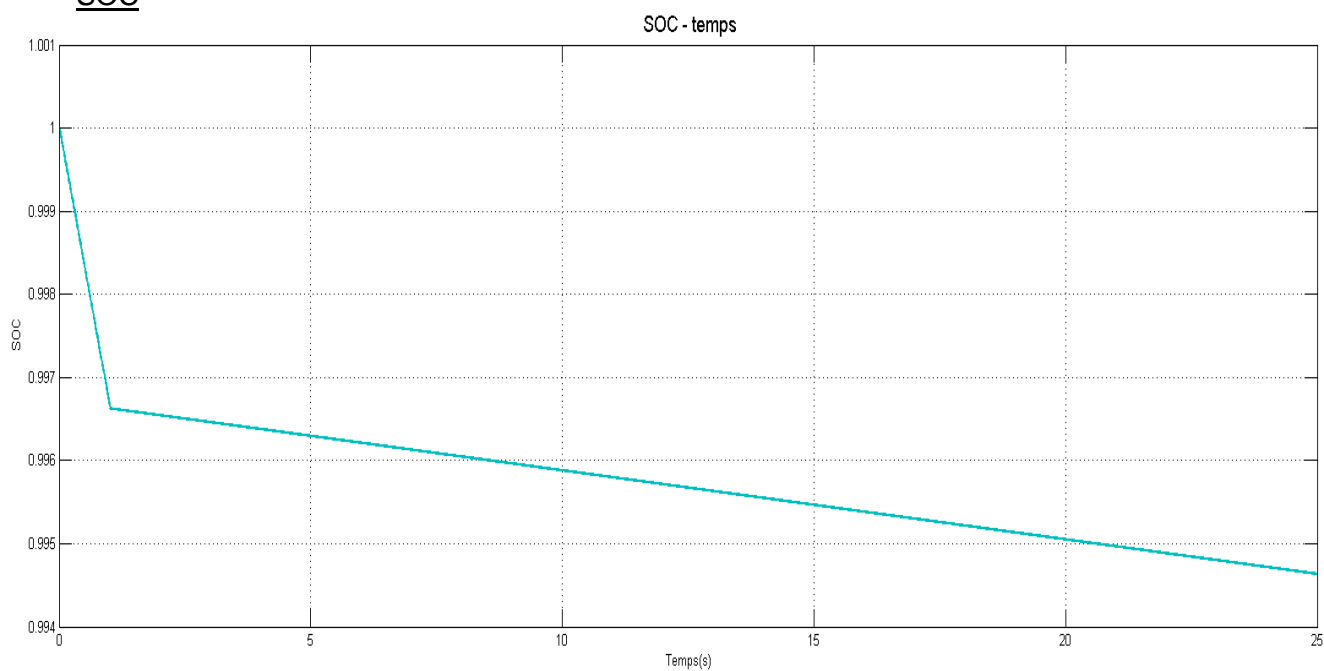


Figura 6.7 Evolució del SOC durant l'Skid Pad

Com era d'esperar el SOC pràcticament no disminueix com s'aprecia en la *Figura 6.7*.



## 6.2. Simulació de l'acceleració

Aquesta és la prova més senzilla de simular, simplement es tracta de modelar un circuit de radi de curvatura infinit i entrar-li com a velocitat de referència un graó de velocitat, sent aquesta una velocitat de gran magnitud. Per fer un bon paper en aquesta prova el monoplaça hauria de recórrer els 75 metres en 3,5 segons per guanyar o 4 per quedar a la part mitja de la taula. Introduint una configuració de l'aerodinàmica amb un  $C_d$  de 1,5, els resultats són els següents:

Velocitat real / velocitat de referència

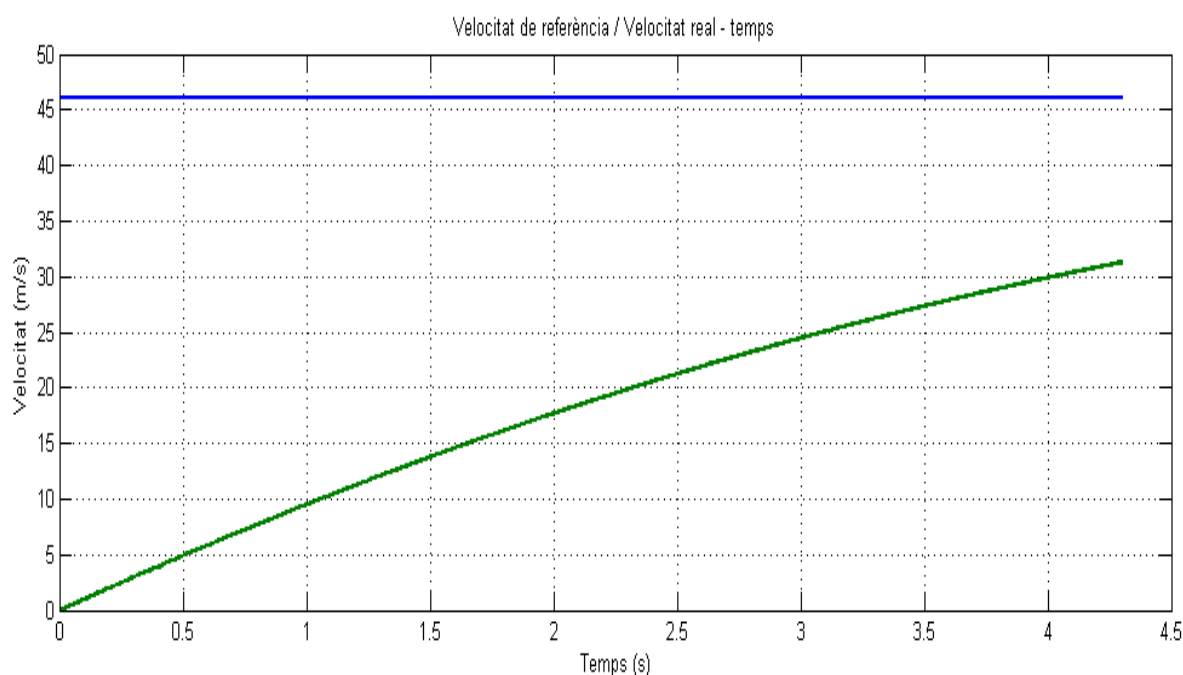


Figura 6.8 Comparació de les velocitats de referència i reals en una acceleració

Com es pot apreciar en la *Figura 6.8*, el vehicle no pot seguir la velocitat de referència degut als límits en potència i en parell del motor.

Això afecta al temps de la prova, que com es veu en el gràfic de la distància de la *Figura 6.9*.

### Distància recorreguda

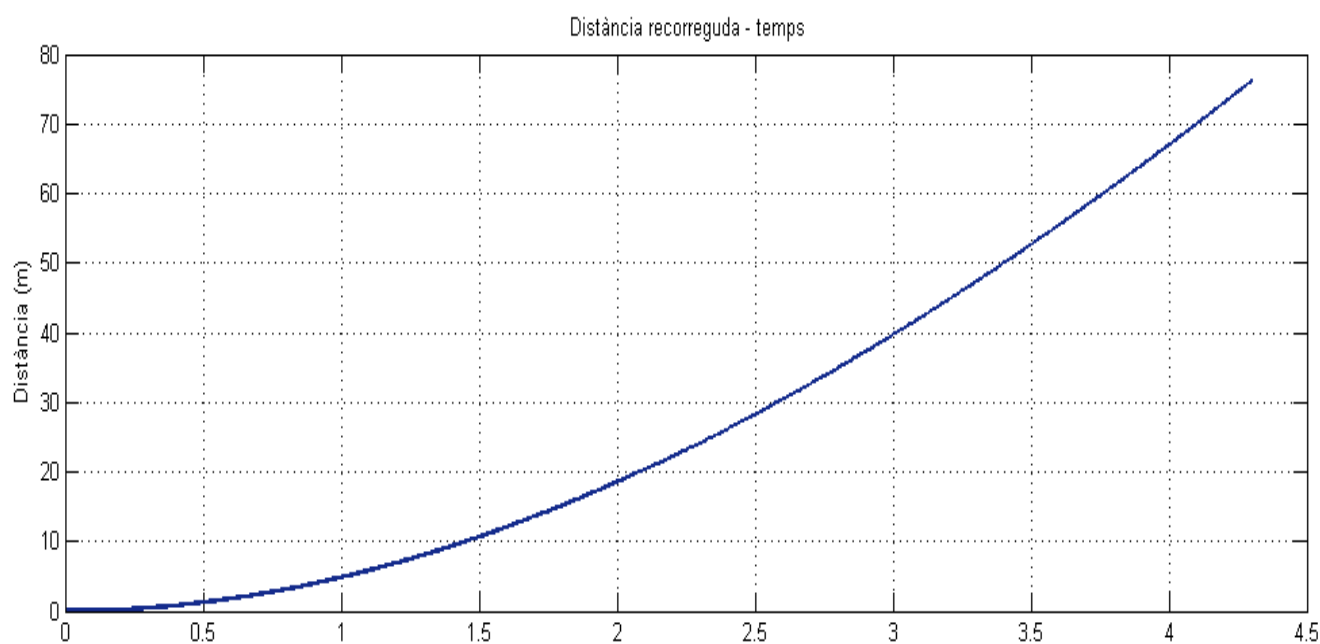


Figura 6.9 Distància recorreguda durant l'acceleració

El CAT-07e segons la simulació seria capaç de realitzar la prova de l'acceleració recurrent els 75 m en un temps de 4,25 segons. Un detall interessant és veure l'evolució de les forces normals al davant i al darrere del vehicle com en la *Figura 6.10*.

### Força normal davantera i posterior

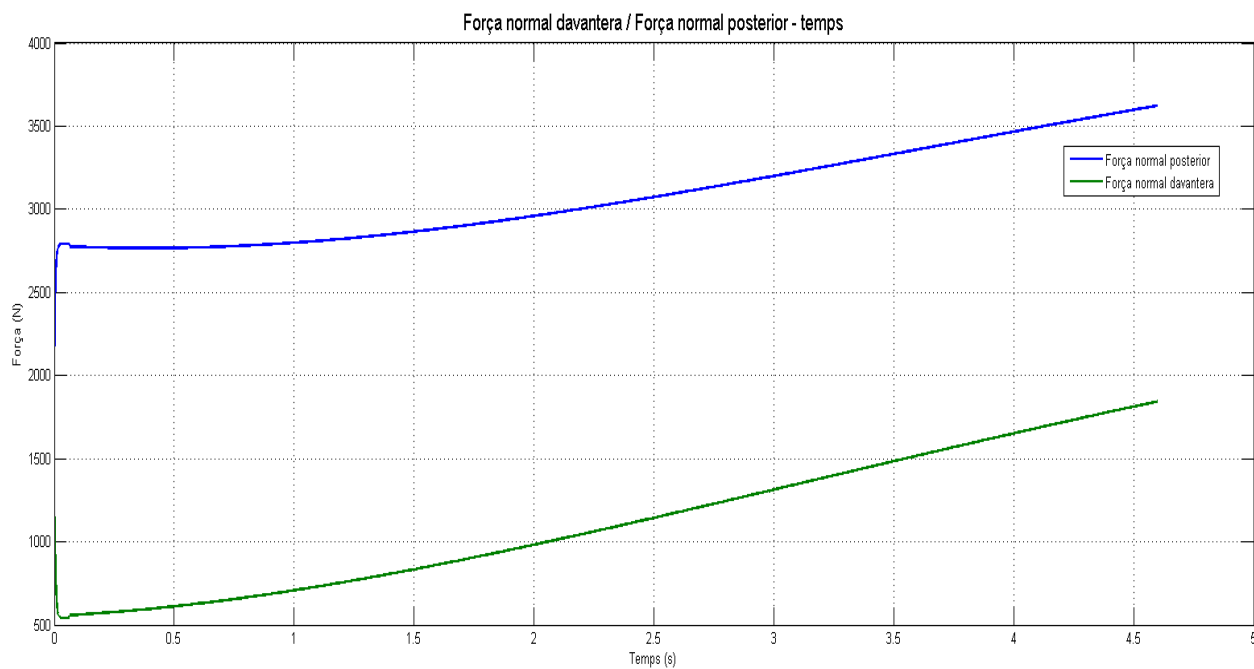


Figura 6.10 Comparació de les forces normals durant l'acceleració

### Voltatge de bateries

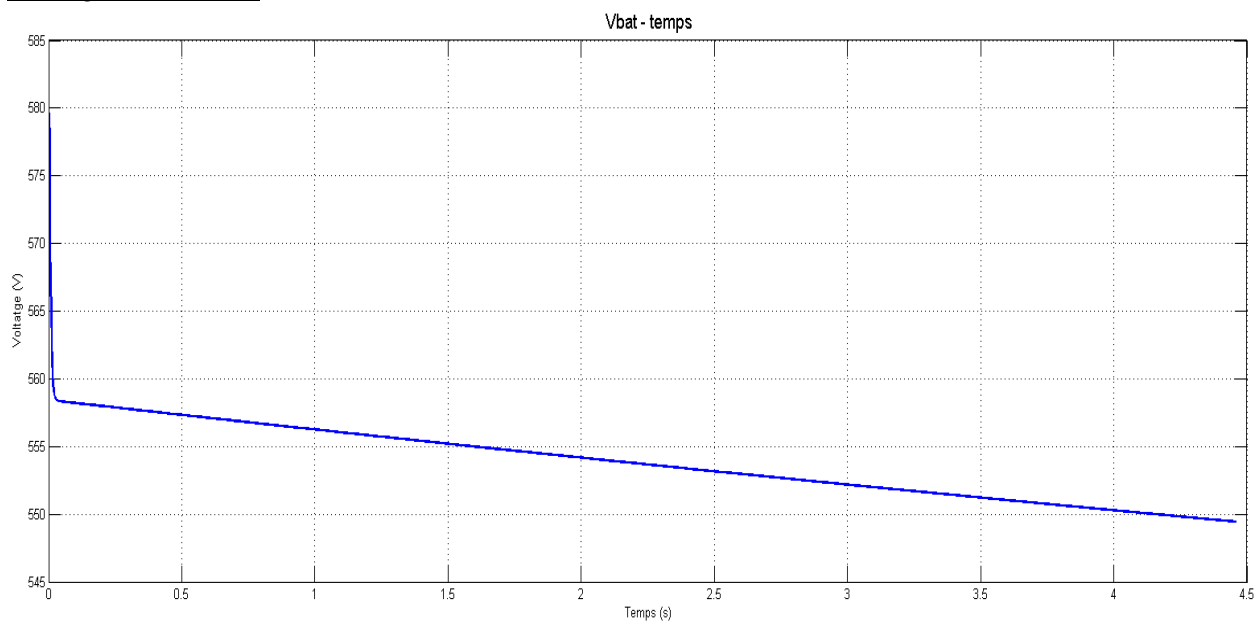


Figura 6.11 Voltatge de bateries durant l'acceleració

### Intensitat de bateries

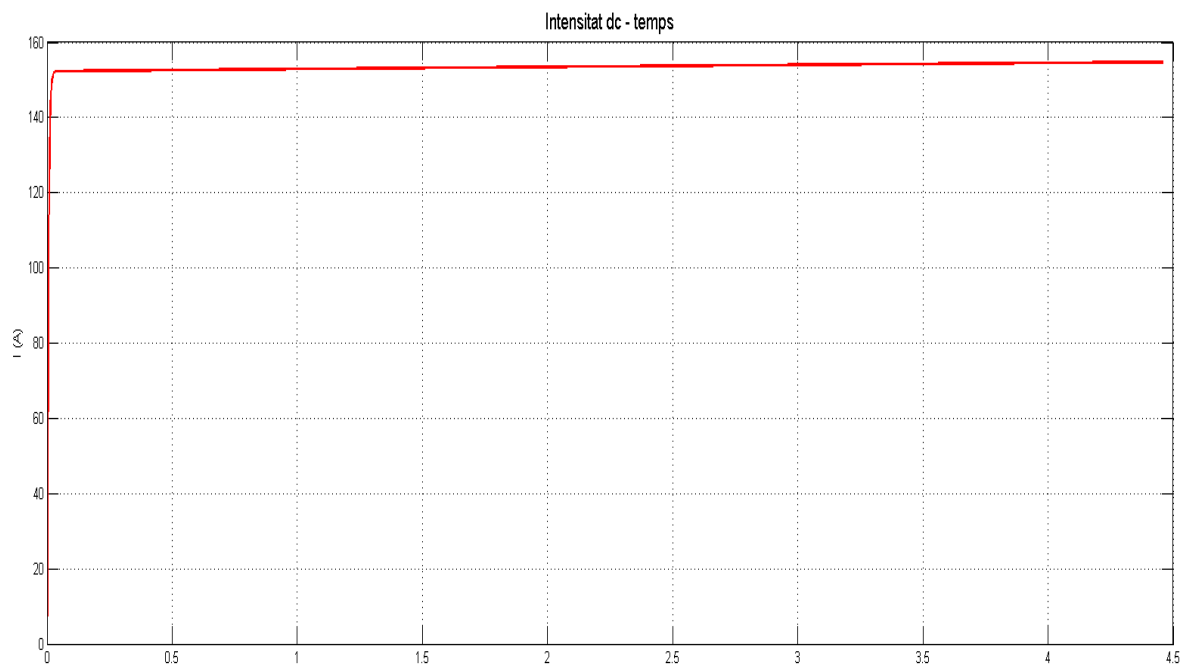


Figura 6.12 Intensitat de bateries durant l'acceleració

El corrent de les bateries en la *Figura 6.12* està limitat al màxim permès pel límit de potència, això indica que el cotxe anirà al màxim durant tota la prova tal i com indica el gràfic de potència de la *Figura 6.13*.

### Potència desenvolupada

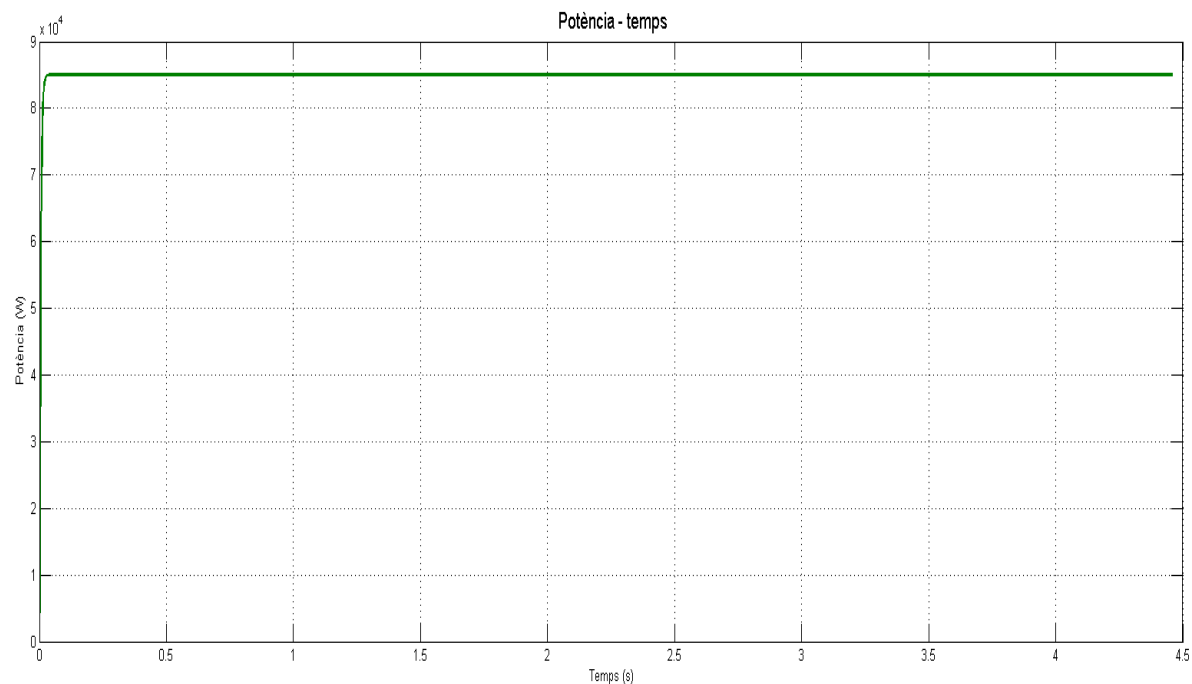


Figura 6.13 Potència desenvolupada pels motors durant l'acceleració

### Energia consumida

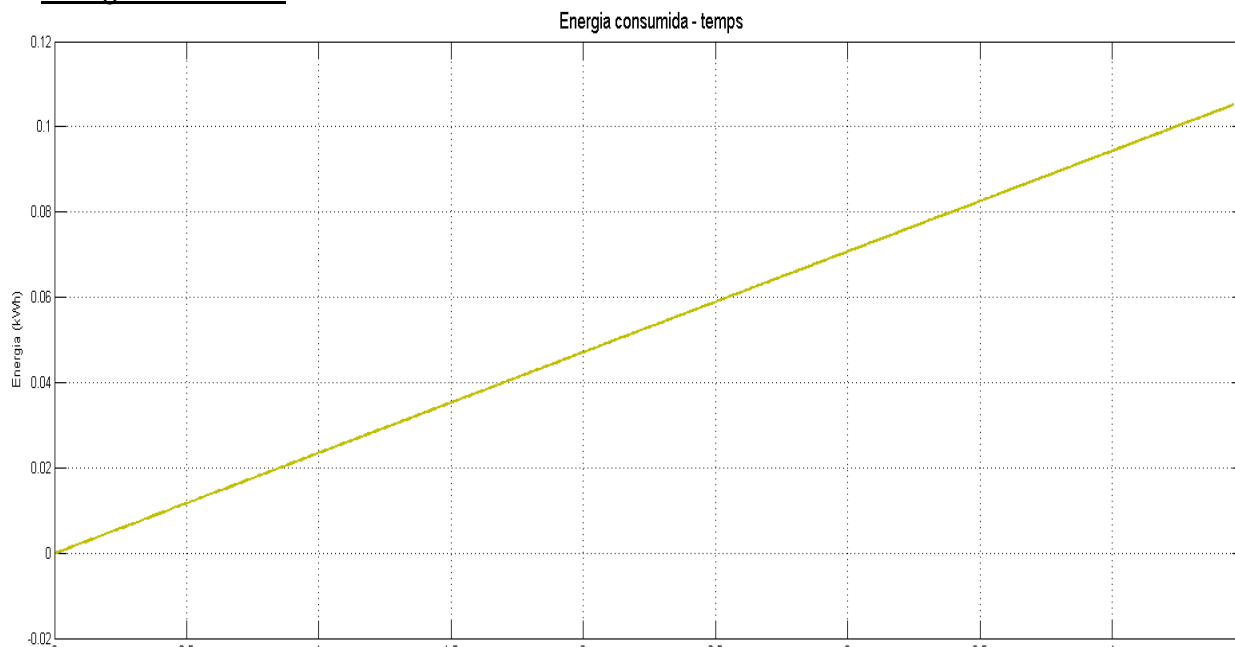


Figura 6.14 Energia consumida durant l'acceleració

L'energia consumida durant l'acceleració com es veu en la *Figura 6.14* tampoc resulta rellevant.

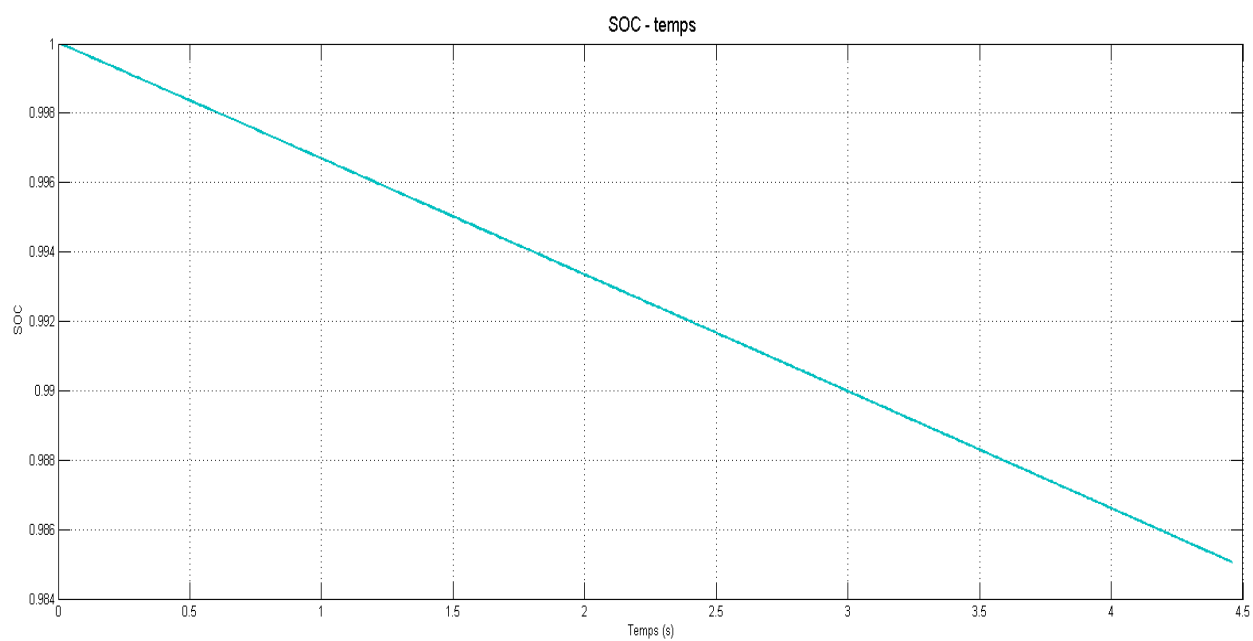
SOC

Figura 6.15 Evolució del SOC durant l'acceleració

### 6.3. Simulació de l'autocross

Tal i com s'ha comentat anteriorment, es simularà l'autocross just després de dur a terme la prova de l'acceleració.

Per realitzar aquesta simulació s'ha creat un arxiu .mat de Matlab de tres files, amb el temps a la primera, la velocitat en la segona i el radi de curvatura en la tercera.

El circuit és del de la Figura 6.16 i representa el circuit real de la Fórmula Student Germany de l'any 2012.

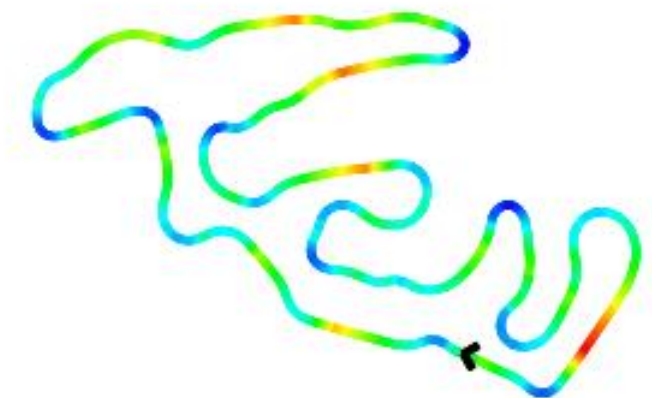


Figura 6.16 Circuit de l'autocross

Utilitzant el programa Optimum Lap s'ha pogut extreure les velocitats òptimes en cada punt del circuit sense que el cotxe derrapi ni perdi el control així com els radis de curvatura.

Introduint les dades corresponents al model els resultats són els següents:

### Velocitats reals i de referència

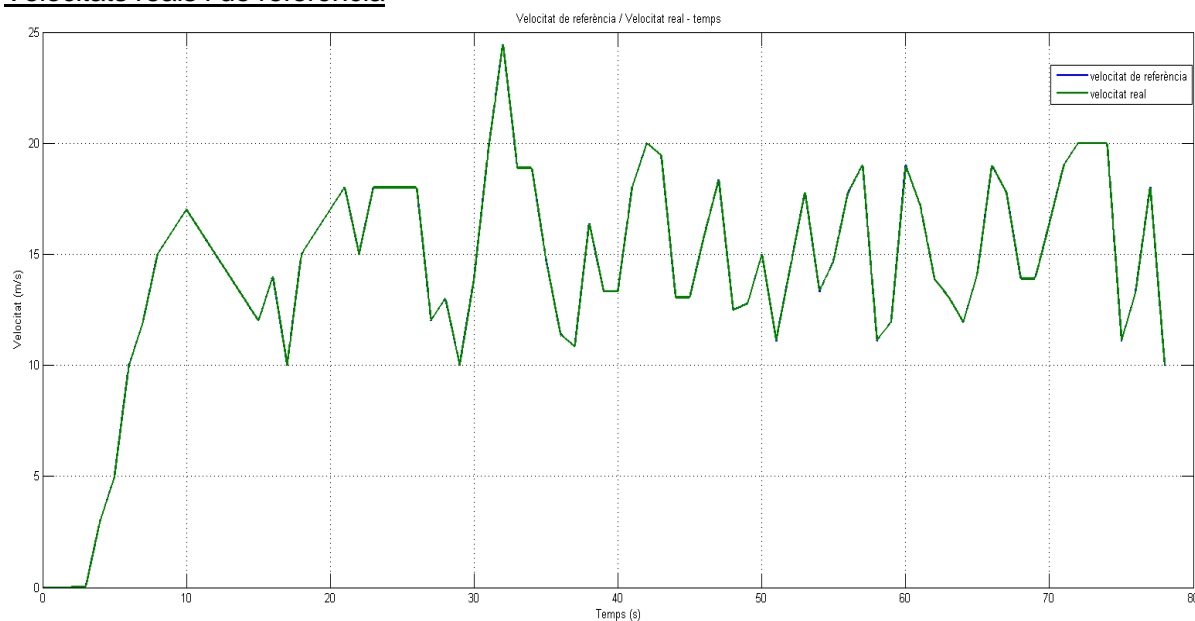


Figura 6.17 Comparació de les velocitats de referència i real durant l'autocross

El vehicle com a molt haurà d'anar a 25 m/s , uns 90 km/h valor que és capaç d'assolir. Les velocitats de referència i reals són les mateixes tal i com es veu en la *Figura 6.17* així que en principi el vehicle és capaç d'efectuar la prova de manera òptima. També resulta interessant graficar com varien les velocitats de les rodes en funció del radi de curvatura, resultant-ne la

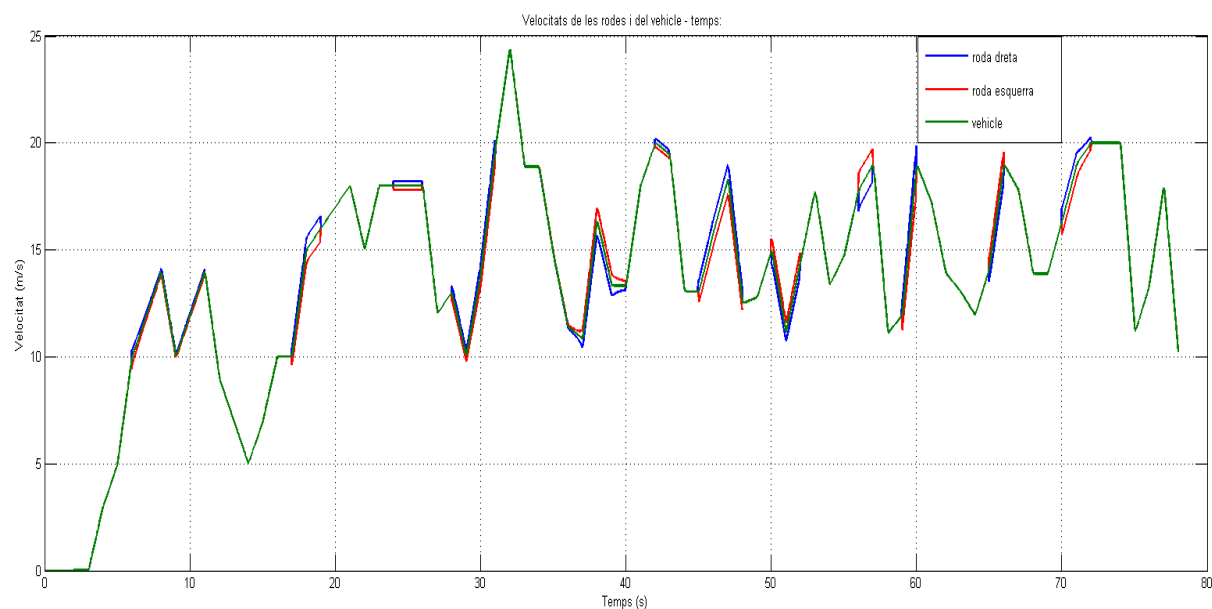


Figura 6.18 Velocitats del vehicle, roda dreta i roda esquerra



### Voltatge de bateries

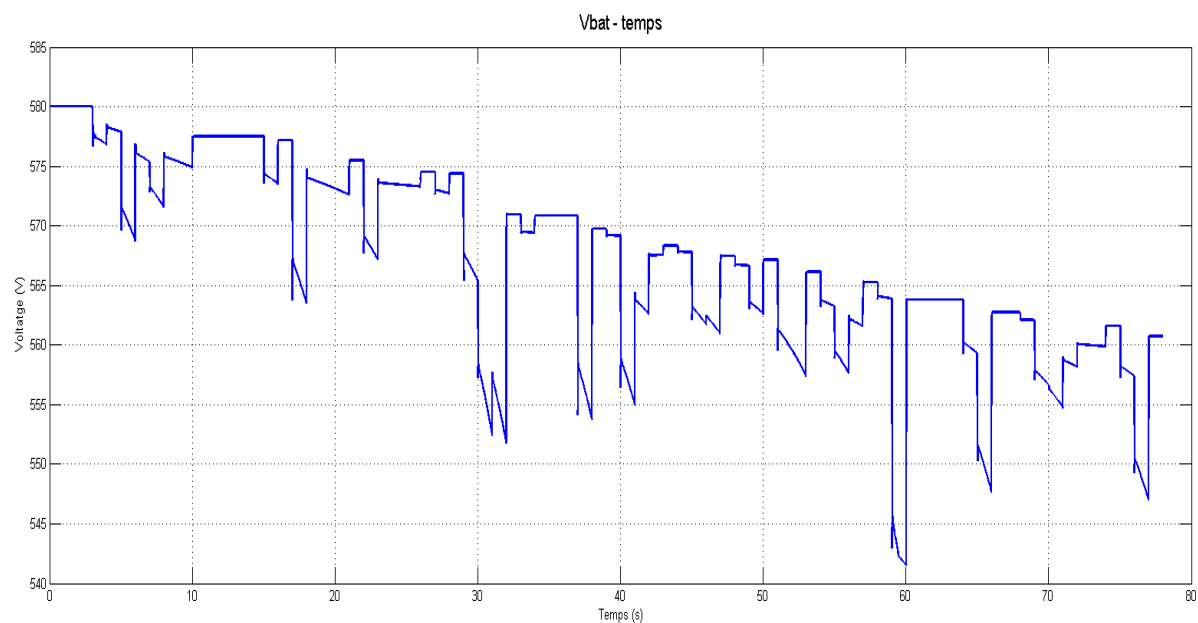


Figura 6.19 Voltatge de bateries durant l'autocross

### Intensitat de bateries

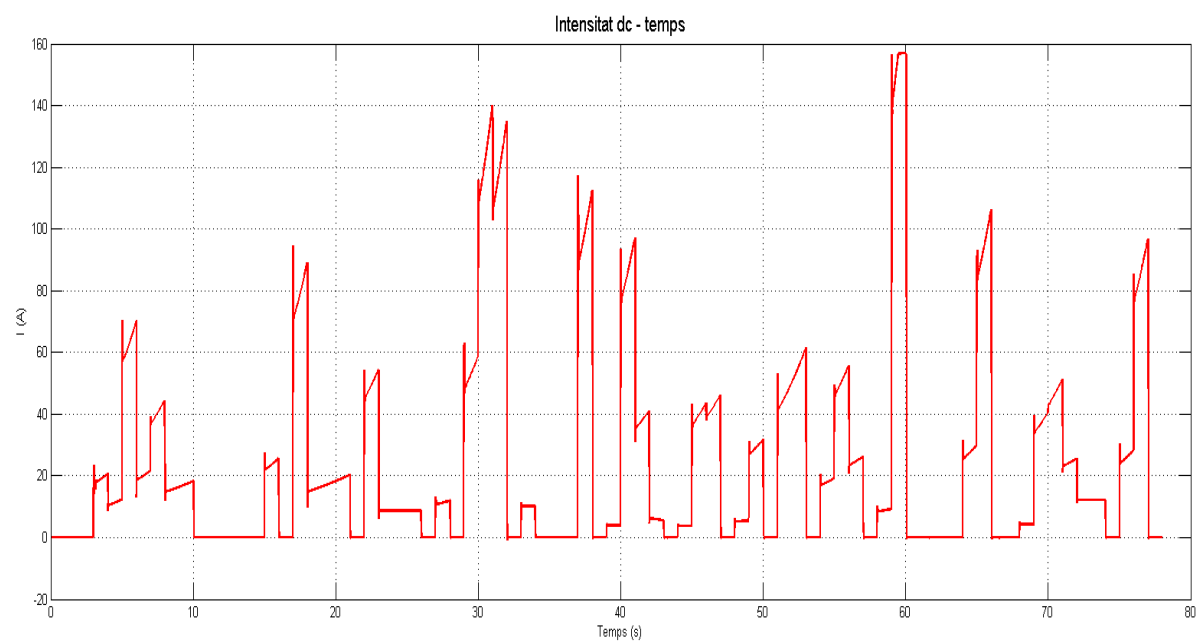


Figura 6.20 Intensitat de bateries durant l'autocross

## SOC

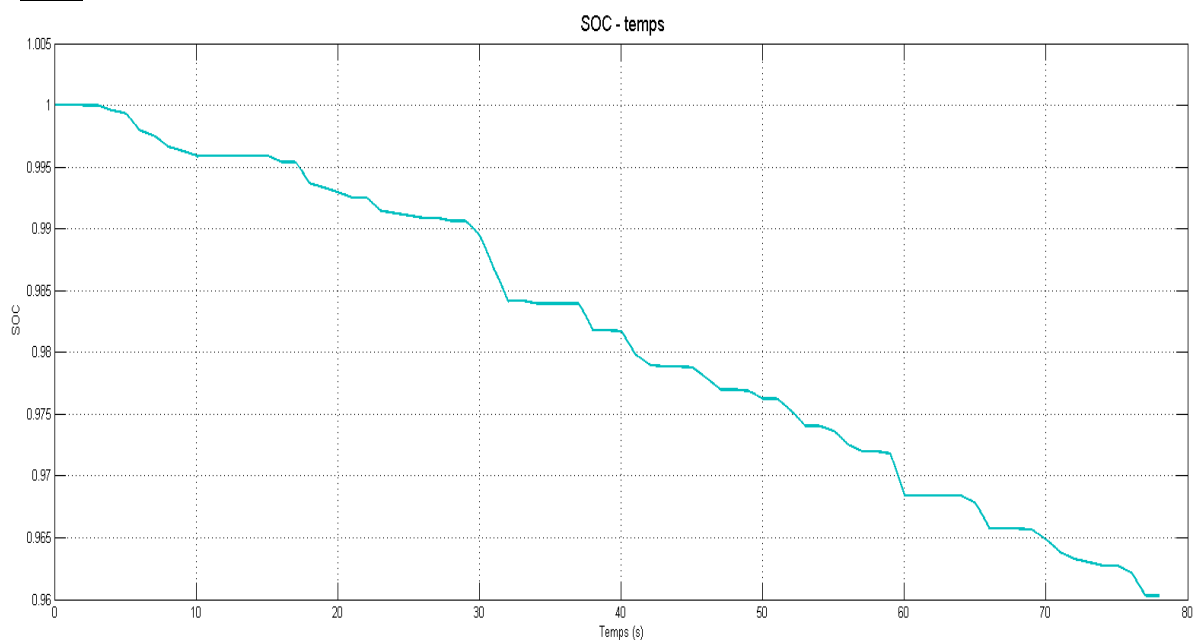


Figura 6.21 Evolució del SOC durant l'autocross

L'autocross és la segona prova que més consum representa pel vehicle, fent disminuir el SOC de la Figura 6.21 fins un 4%.

## Energia consumida

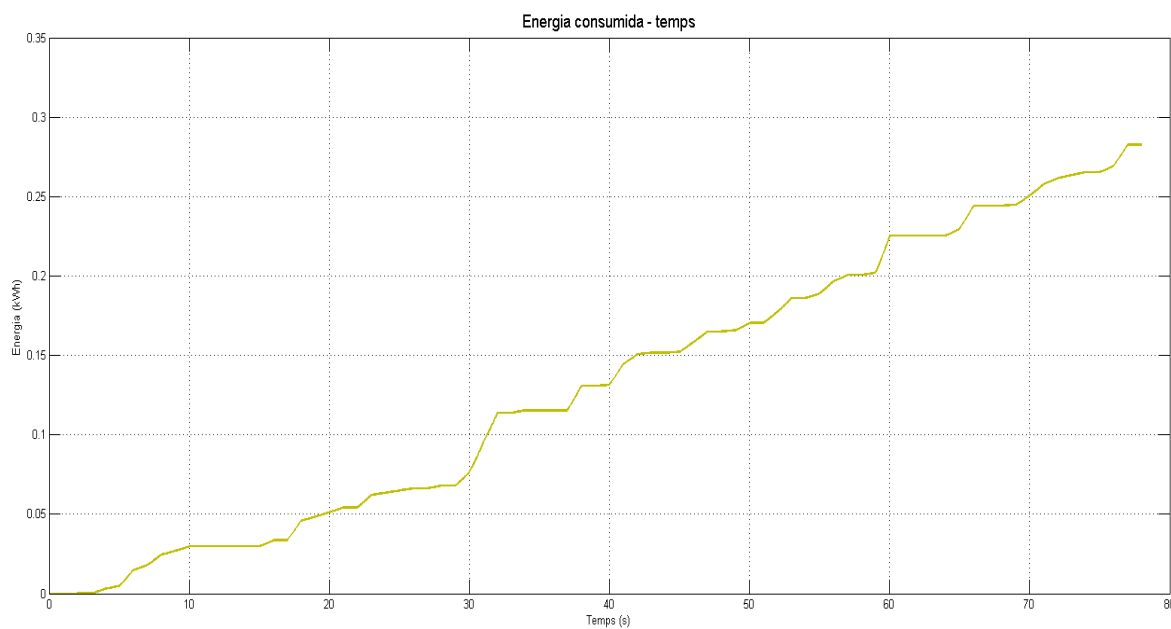


Figura 6.22 Energia consumida durant l'autocross

## 6.4. Simulació de l'endurance

Per realitzar la simulació de l'endurance s'han dut a terme els mateixos passos que per simular l'autocross.

El pitjor dels casos en el que el vehicle hauria de realitzar l'endurance seria a velocitats d'autocross, per tant per fer-ho s'ha utilitzat el circuit i velocitats anteriors i s'ha simulat com si el vehicle fes 19 voltes, tot i que les necessàries per assolir els 22 km de l'endurance serien 18,7.

Els resultats obtinguts són els següents:

### Distància recorreguda

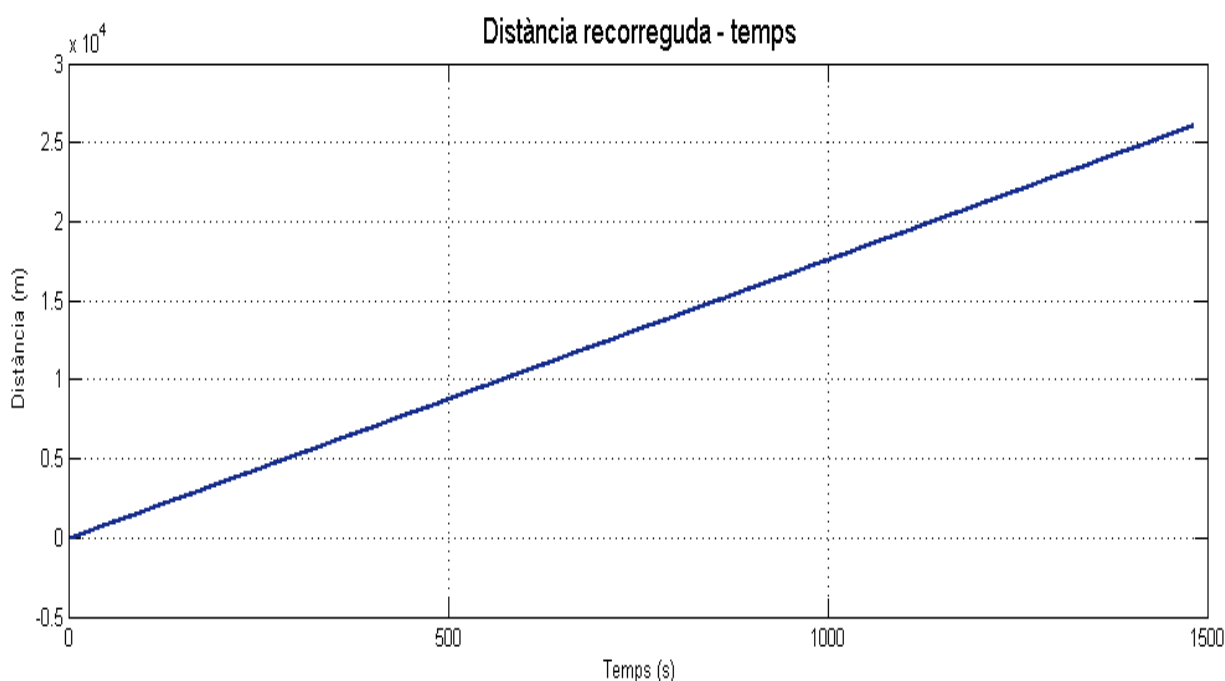


Figura 6.23 Distància recorreguda durant l'endurance

La distància recorreguda de la Figura 6.23 és major que els 22 km de la prova, però això és degut a que s'han simulat 19 voltes.

### Energia consumida

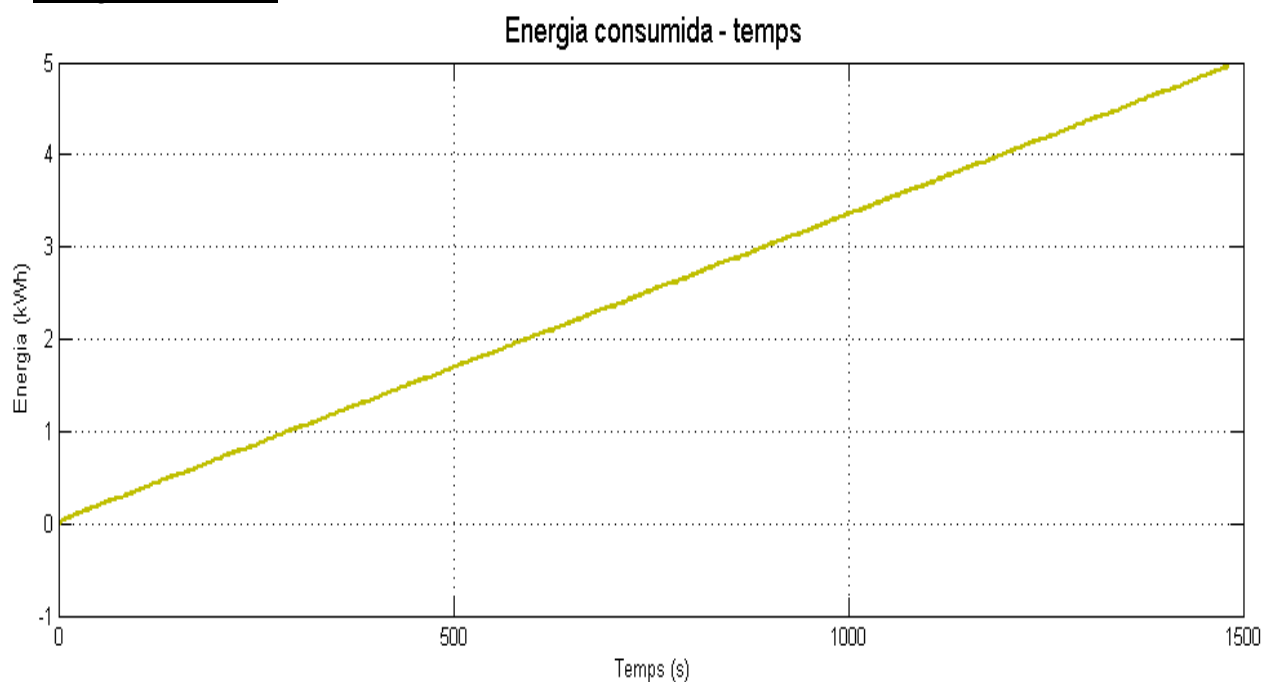


Figura 6.24 Energia consumida durant l'*endurance*

L'energia consumida tal i com es veu en la *Figura 6.24* al finalitzar la prova és de 5 kWh, menor que els 6,6 kWh que poden aportar les bateries.

### SOC

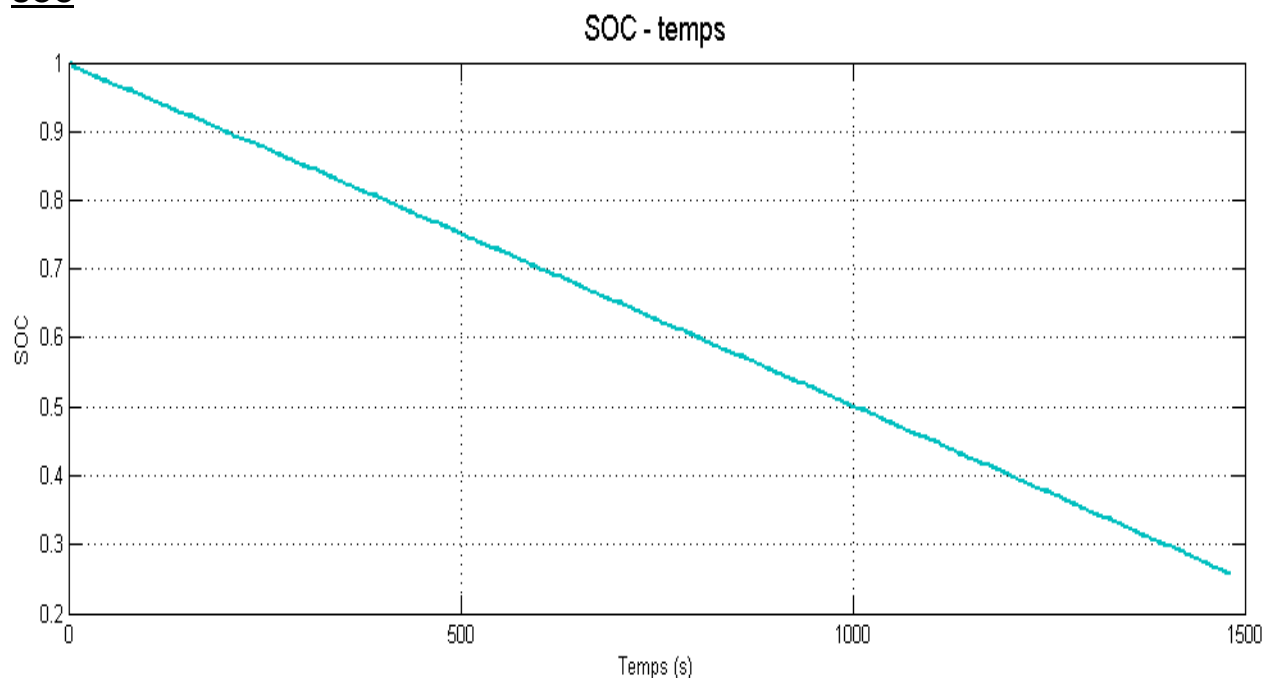
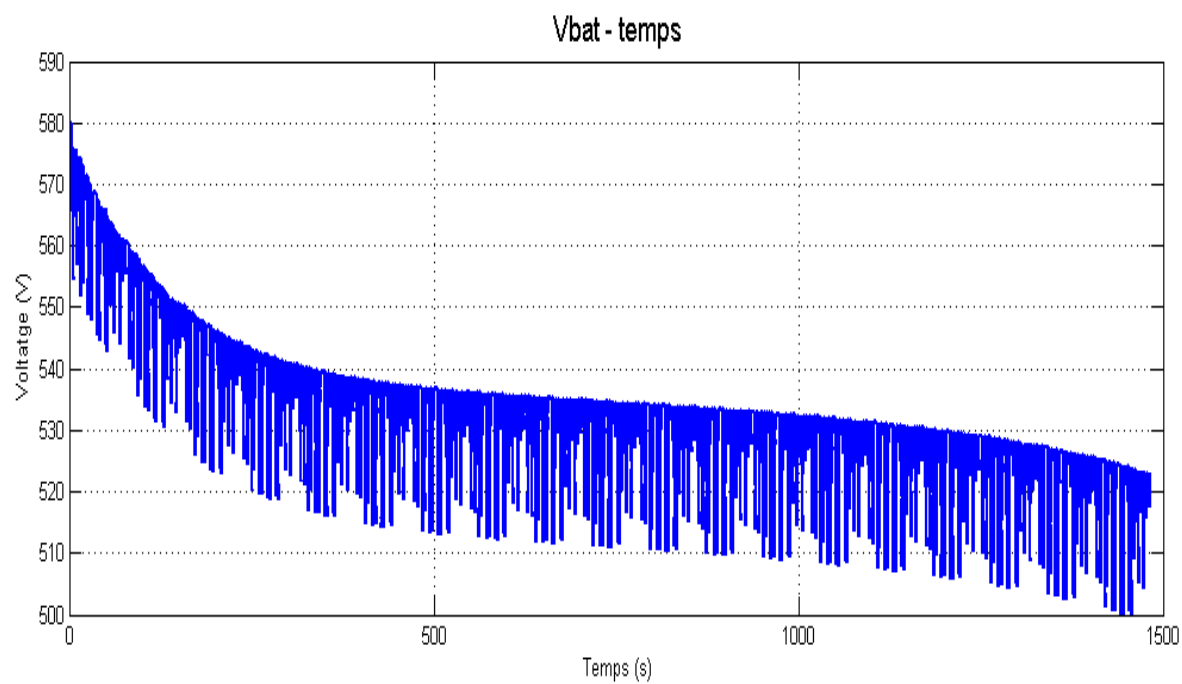


Figura 6.25 Evolució del SOC durant l'*endurance*

### Voltatge de bateries



### Intensitat de bateries

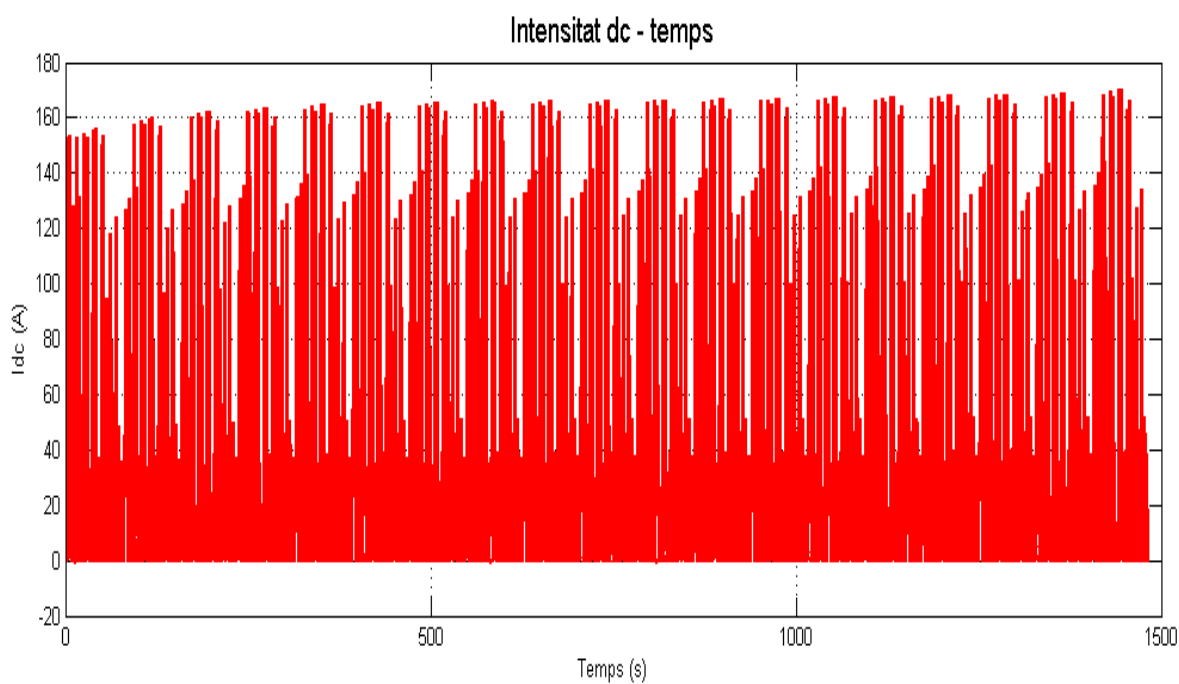


Figura 6.27 Intensitat de bateries durant l'*endurance*

## 7. Anàlisi dels resultats i conclusions

A partir de les simulacions realitzades se'n pot extreure les següents conclusions:

El CAT-07e és capaç de realitzar de manera òptima les proves de l'Skid Pad, autocross i endurance, optant a una posició de podi en cada un dels tres esdeveniments.

Des del punt de vista energètic, el vehicle té prou energia per acabar totes les proves i dur-les a terme de la manera desitjada, inclús l'endurance, la qual cosa indica que el dimensionament de les bateries és el correcte tot i que quedaria sobrant 1,5 kWh i les bateries quedarien a un 20% del SOC.

Aquest consum no té en compte el rendiment de la transmissió i els altres elements del vehicle, i si s'aplica un rendiment del 85% augmenta en 0,75 kWh, la qual cosa redueix l'energia sobrant a 0,85 kWh el que equivaldria a una reducció de pes de 5 kg.

En principi si el cotxe comença completament carregat o amb una descàrrega molt baixa mai s'arribarà al límit de corrent de les bateries, que és de 200 A, la qual cosa indica que no s'ha de patir per malmetre les bateries o altres elements que conformen la part elèctrica.

Si s'analitzen els resultats de la prova d'acceleració es com el cotxe no és capaç de seguir el cicle de referència. Tot i que la prova es desenvolupa sempre al màxim de la potència permesa, realitza l'acceleració en 4,48 segons el que significa una posició en la part mitja-baixa de la taula de qualificacions. Una possible causa d'aquesta diferència és el pes, ja que els vehicles més punters de la Fórmula Student pesen fins a 100 kg menys que el CAT-07e. Altres factors que afectarien seria la força resistiva de drag i downforce, encara que tenen un pes menor en el desenvolupament d'aquesta prova.

Per tant, es considera assolit l'objectiu de crear una eina que sigui capaç de simular el vehicle segons diversos cicles a realitzar, extreure'n resultats a nivell energètic i que permeti dimensionar les bateries del cotxe a la vegada que és possible comprovar si els corrents o tensions de bateries excedeixen dels límits segurs per no malmetre els elements que conformen el tren de potència del vehicle.

A més a més també són resultats que poden ser d'utilitat a l'hora de defensar el disseny de les bateries davant els jutges de les diverses competicions de la Fórmula Student i que permeten demostrar que darrere de les eleccions realitzades hi ha un fonament raonat i basat en resultats obtinguts a partir de l'aplicació de coneixements dels elements del vehicle i utilitzant metodologies de càlcul i disseny d'enginyeria.

## 8. Futures línies de treball

Com s'ha comentat en capítols anteriors, en la realització d'aquest projecte s'han efectuat simplificacions que fan que el projecte no acabi de ser 100% un model del CAT-07 real.

Com a futures línies de treball es proposa la implementació del model dels inversors més realista, amb el model de les branques d'IGBT's, el control de la posició de l'eix del motor mitjançant el control així com millores a nivell electrònic com un control d'estabilitat apte per ser implementat al vehicle real i la frenada regenerativa.

Un altre aspecte a millorar és la part dinàmica del model, incloent un model de suspensions i del pneumàtic de manera que els resultats siguin més fiables i sigui possible també extreure resultats a nivell dinàmic

Per acabar també seria interessant poder afegir un model tèrmic del vehicle per poder dimensionar i estudiar la refrigeració dels motors, inversors i bateries.

## 9. Estudi econòmic

Per la realització de l'estudi econòmic, al tractar-se d'un projecte que bàsicament comprèn feina feta en termes de disseny i implementació de software, només s'han tingut en compte els costos de personal.

El projecte es pot diferenciar en dues fases:

La primera comença la segona setmana de febrer, tot coincidint amb l'inici del semestre, i acaba l'última setmana d'abril. Durant aquesta etapa s'han realitzat les tasques de cerca de documentació útil i adquisició dels coneixements necessaris per dur a terme el projecte.

La segona es va iniciar a principis de maig i va finalitzar a principis de juny.

En total 17 setmanes, 11 per la primera i 6 per la segona on el cost de personal queda reduït segons la *Taula 9.1*.

Cost dels recursos humans del projecte			
Activitat	Quantitat (hores)	Preu (€/h)	Cost (€)
Fase 1	308	45	13 860
Fase 2	180	45	8100
Total	488	45	<b>21960</b>

Taula 9.1 Cost dels recursos humans de projecte



## 10. Planificació del projecte

Per tal de tenir una idea de la durada del projecte, definir una data límit i controlar de manera efectiva el seu desenvolupament, a l'inici de la primera fase es va realitzar una taula amb les diverses activitats a dur a terme.

Dividit en dues fases diferenciades separades per les vacances de setmana santa, la primera comprenia el desenvolupament i disseny del software i la segona la realització de les simulacions i l'escriptura de la memòria.

La segona fase del projecte va ser modificada en motiu del canvi de dates en l'entrega i al saber la data de presentació.

Aquesta organització seguida és la que es representa en les *taules Taula 10.1 i Taula 10.2*

Programació projecte				
	ACTIVITAT	INICI	FI	DURADA
Model	Modelització de l'entorn (condicions aerodinàmiques, coef de rodadura, etc)	3 març	10 març	7 dies
	Modelització de motors	10 març	24 març	14 dies
	Modelització de Transmissió	24 març	31 març	7 dies
	Modelització de Rodes	31 març	7 d'abril	7 dies
	Modelització de inversors	7 d'abril	14 d'abril	7 dies
	Modelització de bateries	14 d'abril	21 d'abril	7 dies
	Model elèctric i dinàmic complet acabat	21 d'abril	28 maig	7 dies
	Implementació de sistemes de control	28 d'abril	5 maig	7 dies
Memòria	Simulacions i adquisició de resultats	5 maig	19 maig	14 dies
	Discussió dels resultats obtinguts	19 maig	26 maig	7 dies
	Finalització de la redacció de la memòria	26 maig	9 Juny	14 dies
	Redacció de annexos, bibliografia, agraïments i repàs de la memòria	9 Juny	23 Juny	14 dies
	Dipòsit del projecte	23 Juny	23 Juny	1 dia
	Preparació presentació	23 Juny	11 Juliol	18 dies
	PRESENTACIÓ	11 Juliol	11 Juliol	1 dia

Taula 10.1 Programació del projecte

### Taula 10.2 Calendari del projecte

## 11. Agraïments

M'agradaria agrair al tutor del projecte, Daniel Montesinos tot l'esforç i la implicació dedicada al projecte, així com la seva ajuda a l'hora de solucionar els problemes que han anat sorgint durant el seu desenvolupament.

Agrair també a tot l'equip ETSEIB Motorsport la disposició i l'ajuda a l'hora de proporcionar dades de les diverses seccions, gràcies companys d'Aero, Gestió, Body, Dinàmica, Electrònica i sobretot Powertrain per haver fet possible aquest projecte i per fer del CAT-07e més que un monoplaça un objectiu comú, un somni fet realitat i una gran experiència al vostre costat.

I per acabar, i no per això menys important, agrair a la família i als amics la paciència i la comprensió que han tingut pel fet d'haver passat moltes més hores al Fórmula que a casa, o per haver estat desaparegut i absent durant aquests últims mesos.

A tots, gràcies per haver fet possible aquest projecte i per ajudar-me a tirar-lo endavant.

## 12. Bibliografia

### 12.1.Referències bibliogràfiques

- [1] A. BOUSCAYROL: *EMR graphical rules*, A. Bouscayrol, L2EP, Université Lille1, 2014
- [2] MEHRDAD EHSANI, YIMIN GAO, ALI EMADI: *Modern electric, hybrid electric and fuel cells vehicles. Fundamentals, theory and design. Second Edition.*
- [3] MELASTA: *SLPBA843126 3,7 V 6350 mAh 15C Datasheet*
- [4] SAE INTERNATIONAL: *2014 FSAE Rules*
- [5] TREMBLAY, OLIVIER, LOUIS-A DESSAINT, Y ABDEL-ILLAH DEKKICHE. :*A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid vehicles: IEEE*, 2007: 284-289.
- [6] CRISTIAN FONTAN TEBAR: *Modelización de un vehículo eléctrico de la fórmula student.*
- [7] <http://hdl.handle.net/2099.1/19631>
- [8] <http://hdl.handle.net/2099.1/2959>
- [9] MELASTA: *SLPBA843126 3,7 V 6350 mAh 15C Performance curves*
- [10] <https://www.formulastudent.de>

### 12.2.Bibliografia complementària

Miller, John M. *Propulsion systems for hybrid vehicles*. London: The institution of electrical engineers, 2010.

Chandana Perera, P. D. *Sensorless control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives*. Aalborg: Institute of energy technology Aalborg University. Thesis, 2002.

<http://www.etsib-motorsport.upc.edu>



<http://www.mathworks.com>